Guide d'information sur la sécurité
des véhicules à hydrogène et des stations-service de distribution d'hydrogène



Guide d'information

JUIN 2015

En partenariat avec :





Travaux réalisés par Seita Consulting et FCellSys, accompagnés et soutenus par l'ADEME.

Membres

Comité de pilotage et rédacteurs

- ADEME : Luc Bodineau,
- FCellSys : Florent Petit, Guillaume Bretin, Jean-Marc Le Canut, Xavier François, Sophie Collong
- Seiya Consulting : Claudine Sauval, Bertrand Chauvet, Gérard Planche

Comité technique et contributeurs

- Air Liquide : Adrien Zanoto
- AJC : Jean-Michel Joly
- Alca Torda Applications : Isabelle Ticos
- Allianz Zentrum für Technik : Christoph Lauterwasser
- Alphéa Hydrogène : Michel Junker
- AREVA H2Gen : Fabien Auprêtre
- CEA : Joël Danroc
- CEA Le Ripault : Fabien Nony, Stéphane Villalonga
- CETU : Christophe Willmann
- DGPR : Lionel Prévors
- Djeva : Katia Djevarhirdjian, Nicolas Vauthey
- DREAL Rhône-Alpes : Cathy Day
- INERIS : Benno Weinberger
- La Poste : Éric Gauthier, Emmanuel Raoult
- Linde : Christophe Coulibeuf
- McPhy : Pascal Mauberger
- Raigi : Olivier Perrier
- Renault Trucks : Élisabeth Depasse, Christophe Vacquier, Christian Montagnon
- SDIS 04 : François Laumann
- Semitan : Pascal Fourniès, Pierre-François Gérard
- SymbioFCell : Fabio Ferrari, Patrice Domenge
- Toyota Motors Europe : Julien Roussel

Sommaire

4 - Le véhicule à hydrogène

6 - Annexes

Contenu et objectifs du guide

Ce guide s'adresse à un public large, non spécifiquement connaisseur, mais intéressé par les nouvelles technologies utilisant l'hydrogène dans le domaine de la mobilité et potentiellement impliqué dans le cadre d'un projet de déploiement d'une station-service ou de véhicules à hydrogène :

- gestionnaires de flottes de véhicules légers, privés ou publics ;
- responsables sécurité et environnement d'entreprises, d'organismes, de collectivités ;
- maîtres d'ouvrage dans le domaine des transports et des infrastructures ;
- exploitants de stations-service ;
- services départementaux d'incendie et de secours (SDIS) ;
- direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL).

D'une manière générale, il s'adresse à tout public intéressé par la mobilité propre et les alternatives de transport plus respectueuses de l'environnement.

Après un rappel du contexte et de l'intérêt de l'hydrogène, le chapitre 1 présente les différentes technologies en jeu, de la production du gaz à son utilisation dans des véhicules en passant par son transport et son stockage. Le chapitre 2 décrit les caractéristiques physiques et chimiques de l'hydrogène, les risques associés et les principes généraux pour le mettre en œuvre en toute sécurité. Le chapitre 3 concerne la station-service de distribution d'hydrogène ; il en décrit les éléments constitutifs et aborde les questions sécuritaires lors des deux étapes clés : la construction d'une station-service et son exploitation. Le véhicule hydrogène est, quant à lui, abordé dans le chapitre 4 : conception, homologation, utilisation et maintenance, accidents et durée de vie des équipements.

Ce document présente néanmoins certaines limites qu'il convient de préciser :

- Il est établi sur les connaissances et développements actuels, son contenu pourra être ultérieurement complété et actualisé en fonction des évolutions des technologies dans le domaine de la mobilité.
- Il offre un premier niveau d'information et des recommandations générales qui devront nécessairement être complétées dans le cas d'un projet précis de déploiement d'une station-service et de véhicules à hydrogène par une analyse de risques spécifique[1].
- Il fait référence aux textes réglementaires et normatifs relatifs à l'hydrogène et aux gaz sous pression, sans pour autant s'y substituer.

Mots clés : hydrogène, station-service, véhicule, risque, sécurité, prévention.

(1) Étude permettant d'évaluer précisément, méthodiquement et de la façon la plus exhaustive possible les risques que représente une installation ou un équipement pour la sécurité des personnes, celle de l'environnement, et pour l'intégrité de l'outil industriel.

Contexte

Ce chapitre présente de manière succincte l'hydrogène comme vecteur énergétique, son intérêt dans le cadre du développement de la mobilité propre ainsi que la problématique du déploiement des stations-service de distribution d'hydrogène sur le territoire. Il n'aborde pas spécifiquement les questions de sécurité, mais propose une introduction de la thématique plus générale de la mobilité hydrogène.

L'hydrogène, un vecteur énergétique

L'hydrogène (H) est l'élément le plus abondant de l'univers (75 % en masse, 92 % en nombre d'atomes). C'est le plus simple et le plus léger des atomes, constitué simplement d'un noyau et d'un électron gravitant autour. La combinaison de deux atomes d'hydrogène constitue la molécule de dihydrogène (H_2), appelée communément hydrogène, comme dans ce document.

Dans la nature, l'hydrogène se trouve essentiellement combiné à d'autres atomes, comme dans l'eau ou les hydrocarbures. Afin de pouvoir être utilisé comme source d'énergie, il doit donc en être extrait. Pour cette raison, on parle de « vecteur énergétique », qui relie une source à un usage.

Historiquement, l'hydrogène est produit et utilisé par l'industrie chimique comme composant, notamment dans la fabrication d'ammoniac, le raffinage d'hydrocarbures et le traitement des matériaux. Plus de 95 % de l'hydrogène mondial est produit par vaporeformage d'hydrocarbures, notamment de gaz naturel, un procédé de dissociation de molécules carbonées en présence de vapeur d'eau et de chaleur. Son emploi et sa manipulation sont aujourd'hui maîtrisés dans un certain nombre de technologies et de savoir-faire industriels.

Outre ces applications traditionnelles, de nouveaux usages de l'hydrogène se développent, utilisant ce gaz comme vecteur énergétique. Il peut, en effet, être converti en électricité ou en chaleur pour tout un ensemble d'applications, stationnaires ou de mobilité : recharge d'équipements électroniques, alimentation de cycles et deux-roues, fourniture d'énergie pour une antenne relais ou un habitat isolé, groupe de secours pour un site sensible, alimentation auxiliaire ou principale pour des véhicules terrestres, maritimes ou fluviaux, etc.

L'utilisation de l'hydrogène comme vecteur nécessite l'emploi d'une pile à combustible. Il s'agit d'un dispositif électrochimique qui recombine l'hydrogène avec l'oxygène de l'air pour produire de l'électricité, de la chaleur et de l'eau. Une pile à combustible est constituée de cellules élémentaires, chacune composée de deux électrodes séparées par une membrane polymère qui joue le rôle d'électrolyte.

C'est une technologie extrêmement modulaire, couvrant une gamme de puissance très large allant de quelques watts (W) au mégawatt (MW).

L'hydrogène est particulièrement énergétique : un kilogramme d'hydrogène représente 120 mégajoules et libère environ trois fois plus d'énergie qu'un kilogramme d'essence. Il est en revanche beaucoup plus léger et donc encombrant : il faut plus de sept litres d'hydrogène comprimé à 70 mégapascal (MPa) pour obtenir l'équivalent énergétique d'un litre d'essence. Sa faible densité énergétique volumique nécessite ainsi de le comprimer à des pressions élevées ; cela suppose de concevoir, pour les usages en mobilité, des réservoirs spécifiques, typiquement de 20, 35 ou 70 MPa.

REPÈRES - UNITÉS DE PRESSION DES GAZ

- Le pascal (Pa) est l'unité de pression du système international.
- Le bar est une unité de mesure de pression équivalente à 100 000 Pa. Le bar présente l'intérêt d'être proche de l'atmosphère (pression atmosphérique moyenne à la surface de la mer), autre unité de pression.
- 1 MPa (mégapascal) = 106 Pa = 1 000 000 Pa = 10 bar
- Le psi (pound-force per square inch) est une unité de mesure anglo-saxonne de la pression.
- 1 psi = 0,069 bar = 6894,76 Pa

Transition énergétique et mobilité hydrogène

Face aux enjeux du changement climatique, de l'épuisement des ressources fossiles et de la pollution de l'air, le domaine des transports et de la mobilité est fortement encouragé à évoluer vers des solutions plus soutenables, lesquelles, technologiques ou organisationnelles, seront nécessairement multiples. L'électromobilité, qui repose sur l'utilisation de l'électricité comme énergie de traction ou de propulsion, apparaît comme une solution prometteuse : outre l'absence de bruit, les véhicules électriques n'émettent, lors de leur utilisation, aucune émission polluante ou nocive.

La mobilité hydrogène est l'une des solutions d'électromobilité. Un véhicule hydrogène n'est autre qu'un véhicule entraîné par un moteur électrique, alimenté par de l'électricité produite à bord par une pile à hydrogène. Il dispose d'une autonomie de plusieurs centaines de kilomètres, et le temps de remplissage de son réservoir est de quelques minutes. Ces caractéristiques peuvent être intéressantes, notamment là où les véhicules électriques à batterie sont limités en termes de rayon d'action ou de temps d'immobilisation à la recharge.

Des opérateurs expérimentent actuellement cette complémentarité entre véhicules à batterie et véhicules à hydrogène, pour leurs propres usages. C'est le cas du groupe La Poste à travers les projets MOBILHyTEst et Mobypost (voir encadré ci-dessous).

L'hydrogène pourrait contribuer au développement des sources électriques renouvelables (éolien, photovoltaïque, hydraulique), par nature intermittentes, en stockant leur électricité grâce à l'électrolyse de l'eau (réaction de décomposition de la molécule d'eau en hydrogène et en oxygène). Cette électricité pourrait être valorisée ultérieurement dans diverses applications, comme les véhicules équipés de piles à combustible. L'hydrogène peut aussi être produit à partir de biomasse, et notamment de biogaz, par vaporeformage. Ces perspectives s'avèrent intéressantes dans le domaine de la mobilité, où la substitution des carburants fossiles par des sources renouvelables est complexe et nécessite une multiplicité de solutions et de vecteurs énergétiques.

Des expérimentations sont actuellement menées à l'échelle locale ou territoriale, notamment sous l'impulsion de collectivités. C'est le cas de la Semitan (voir encadré ci-contre), opérateur de transport public à Nantes, région par ailleurs fortement impliquée dans le développement de l'énergie éolienne et des énergies marines renouvelables.



Véhicule Renault Trucks Maxity électrique équipé d'une pile à hydrogène, expérimenté par La Poste

Déploiement de stations-service et de véhicules

A ce jour, environ 600 véhicules seulement circulent grâce à l'hydrogène à travers le monde. On dénombre par ailleurs environ 150 stations de distribution d'hydrogène, localisées principalement au Japon, aux États-Unis (Californie) et en Allemagne. Si les verrous technologiques sont bel et bien levés, grâce aux grands programmes de recherche menés depuis des années par les industriels, les constructeurs et les organismes de recherche publics, le déploiement de la mobilité hydrogène soulève désormais des problématiques économiques et industrielles. Au niveau macroscopique, l'investissement dans des stations-service n'est envisageable que si l'offre commerciale de véhicules est suffisante ; à l'inverse, celle-ci ne peut se développer à une échelle industrielle que si les infrastructures sont établies sur le territoire, à une échelle suffisamment large pour assurer l'existence d'un marché de la mobilité hydrogène.

Le consortium Mobilité Hydrogène France (25 acteurs[2] industriels, PME, établissements de recherche et collectivités, coordonnés par l'Afhypac, l'Association des acteurs français de l'hydrogène et des piles à combustible) a mené en 2014 une étude prospective sur un plan de déploiement national des véhicules hydrogène (téléchargeable, cf. § 6.4), en lien avec le plan européen Hydrogen Infrastructure for Transport (HIT) soutenu par la Commission européenne. Cette étude propose une évaluation des bénéfices économiques et environnementaux que représenterait le développement de la mobilité hydrogène. Elle identifie un chemin original de déploiement des premières infrastructures de distri-bution d'hydrogène économiquement viable et limitant les risques en termes d'investissement. Il s'appuie sur :

- Les flottes captives de professionnels, d'entreprises, de collectivités pour leurs besoins propres de déplacement ou de services (véhicules et camions de livraison, véhicules utilitaires légers, voitures de société, taxis…), les avantages apportés par le véhicule hydrogène, en termes d'autonomie et de disponibilité, étant à même de répondre à leurs usages, tout particulièrement en milieu urbain et périurbain.
- Des stations-services de distribution d'hydrogène organisées en « cluster », c'est-à-dire localisées près de ces flottes et partagées entre opérateurs. Les profils de déplacement des flottes captives étant prédictibles, rayonnant autour d'un point de ravitaillement, le maillage de stations-service n'a pas besoin d'être déployé sur un territoire élargi. Le besoin d'infrastructure est donc limité.

La Poste, utilisateur pionnier de la mobilité hydrogène

> Éric Gauthier

« La Poste possède la plus grande flotte d'entreprise française avec plus de 60 000 véhicules, dont 5 000 électriques, plus de 20 000 vélos à assistance électrique ainsi que des quadricycles électriques. Depuis juillet 2014, nous exploitons le véhicule électrique à hydrogène identifié par le Département technique véhicules du groupe comme le prolongement du véhicule électrique à batterie. L'objectif est de conserver les avantages du véhicule électrique tout en retrouvant la souplesse d'usage du véhicule thermique en montant une pile à hydrogène en parallèle du système batterie existant. Par rapport à un véhicule électrique à batterie, ce véhicule dit « à prolongateur d'autonomie hydrogène » permet, d'une part, d'augmenter l'autonomie pour atteindre 300 km avec un seul plein d'hydrogène, et, d'autre part, d'augmenter fortement la disponibilité grâce à des temps de recharge en hydrogène de l'ordre de quelques minutes. Du véhicule électrique à batterie, il garde la simplicité d'usage (pas de changement de vitesse et pas d'embrayage) et le confort de travail, notamment l'absence de bruit et de vibrations. En outre, le chauffage de l'habitacle provient de la récupération de chaleur de la pile à hydrogène, sans impact sur l'autonomie. Malgré une offre commerciale pour le moment limitée en termes de modèles de véhicules et l'absence d'infrastructures de recharge en hydrogène, les retombées attendues en matière de compétitivité et de services rendus justifient pour le groupe les investissements importants, à la fois financièrement et sur le plan de l'expertise technique sur une nouvelle technologie. »

> Emmanuel Raoult

« Aujourd'hui, en Franche-Comté, où La Poste mène ses expérimentations, plusieurs véhicules fonctionnent avec de l'hydrogène : des quadricycles dans le cadre du projet Mobypost, des Kangoo et un premier camion utilitaire léger (Renault Trucks Maxity électrique) dans le cadre du projet MOBILHyTEST. Nous souhaitons continuer à élargir notre gamme grâce à l'arrivée de modèles répondant à des besoins complémentaires : volumes plus importants, moyennes et longues distances. Enfin, la fabrication d'hydrogène, localement, à partir d'excédents électriques issus des énergies renouvelables, peut être une solution pour concilier à brève échéance enjeux économiques et enjeux environnementaux dans le secteur de la livraison, un secteur qui doit rapidement trouver des réponses aux nouvelles contraintes environnementales, qui se renforcent en zone urbaine. »



Éric Gauthier
Responsable département technique véhicules / Groupe La Poste



Emmanuel Raoult
Responsable risques incendie / Groupe La Poste

(2) Air Liquide, Alphéa Hydrogène, AREVA Stockage d'énergie, CEA, AREVA H2Gen, EDF, GDF SUEZ, GRTgaz, H2 Logic, Hyundai, IFPEN, INEVA-CNRT, Intelligent Energy, ITM Power, Linde, Michelin, McPhy Energy, Plateforme de la filière automobile, Pôle véhicule du futur, PHyRENEES, Renault Trucks, Solvay, Symbio FCell, Tenerrdis.

Cette logique permet de minimiser les investissements et de proposer un modèle économique abordable pour les opérateurs impliqués. Elle confirme par ailleurs la faisabilité économique d'un approvisionnement de ces flottes de véhicules par une production locale d'hydrogène issu de sources renouvelables.

Une navette fluviale à hydrogène pour le transport de passagers à Nantes

Pierre-François Gérard
Chargé de mission nouveaux produits, nouveaux services / Semitan (Société d'économie mixte des transports en commun de l'agglomération nantaise)

> Pierre-François Gérard
« Forts de notre expérience dans le gaz naturel pour véhicules (GNV), 80 % de nos bus fonctionnant avec ce carburant, nous souhaitons expérimenter la mobilité hydrogène. Pour renouveler une de nos navettes fluviales, nous avons choisi un bateau électrique à pile à hydrogène. Avec l'appui de la Mission hydrogène[3], un consortium de sept partenaires a été constitué pour développer ce projet baptisé NavHyBus. »

Pascal Fourniès
Chargé de mission veille et patrimoine / Semitan (Société d'économie mixte des transports en commun de l'agglomération nantaise)

> Pascal Fourniès
« Nous expérimenterons aussi une flotte de deux ou trois Renault Kangoo électriques équipées de prolongateurs d'autonomie grâce à une pile à combustible. Les solutions d'approvisionnement en hydrogène sont actuellement à l'étude. Cette expérimentation se fait également avec la collaboration du SDIS 44 et de la DREAL pour la partie sécuritaire. C'est l'un des aspects incontournables du projet. Nous procédons étape par étape : l'opération pourrait être étendue par la suite à des flottes de véhicules de service et des véhicules urbains plus lourds (bus et camions). »



© SEMITAN - Nantes

NavHybus Erdre - Navette fluviale à pile à combustible dans le réseau de Transports Publics de Nantes

(3) La Mission hydrogène fédère, dans la région Pays de la Loire, industriels, chercheurs, enseignants autour de la thématique de l'hydrogène-énergie.

1 - De la production aux applications

1.1 - Produire, livrer et stocker de l'hydrogène

1.1.1 - Produire de l'hydrogène

L'hydrogène n'existe pas, à l'heure actuelle, à l'état naturel. Même si des sources d'hydrogène moléculaire ont été récemment découvertes le long de failles sismiques ou sous terre dans des zones aquifères, leur exploitation industrielle n'est pas envisagée à ce jour et reste hypothétique. Selon les modes de production, on distinguera l'hydrogène en fonction de son bilan carbone, puisqu'il peut être issu de ressources renouvelables et non polluantes, ou bien de sources fossiles, avec ou sans émission de carbone.

Plusieurs sources d'hydrogène issues de l'industrie traditionnelle peuvent, dans certains cas, être utilisées pour la filière hydrogène-énergie : l'hydrogène produit par vaporeformage d'hydrocarbures ; l'hydrogène dit « fatal », sous-produit de l'industrie chimique dans la fabrication de chlore, de potasse, ou de l'industrie du PVC.

Comme évoqué précédemment, l'intérêt de la filière hydrogène-énergie réside néanmoins dans la possibilité de nouvelles voies de production à partir de ressources bas-carbone, renouvelables et disponibles selon les territoires. Ainsi, le vaporeformage du biogaz permet de produire de l'hydrogène, comme l'a démontré le projet Vabhyogaz sur le site de Trifyl dans le Tarn. L'électrolyse de l'eau est également une voie promet-teuse dans la perspective d'une production locale, proche des usages, apportant une solution de stockage et de gestion de l'intermittence des ressources électriques renouvelables. Selon l'étude Mobilité hydrogène France, produire l'hydrogène localement peut s'avérer plus économique lorsque le centre de production centralisé est éloigné de plus 150 km de la station-service ou lorsque des sources électriques renouvelables sont disponibles à proximité (ferme éolienne, hydro-électricité, par exemple). Le bilan économique est alors amélioré par une meilleure valorisation des énergies renouvelables en périodes creuses.

1.1.2 - Transporter et livrer de l'hydrogène

Le transport de l'hydrogène, lorsqu'il n'est pas produit sur place, se fait essentiellement par camion ou par pipeline.

À travers un pipeline, l'hydrogène peut être transporté seul ou avec d'autres gaz, cette dernière solution nécessitant des opérations en début et fin de réseau pour mélanger et récupérer l'hydrogène. Ce mélange avec d'autres gaz, notamment le gaz naturel, fait l'objet de démonstrations, par exemple dans le cadre du projet GRHYD porté par GDF SUEZ à Dunkerque. Les pipelines d'hydrogène existent, quant à eux, depuis longtemps. Le plus grand réseau mondial (1 500 km) se trouve en Europe. Il parcourt le Nord de la France, la Belgique et les Pays-Bas. Ces réseaux ont été créés pour transporter de grandes quantités d'hydrogène dans ces zones de forte utilisation industrielle et pétrochimique, tout particulièrement pour le raffinage de pétrole, qui représente plus de 30 % de la consommation mondiale d'hydrogène.

Pour les petites quantités, l'hydrogène gazeux reste majoritairement transporté par camion, principalement sous deux formes :

- Dans des structures métalliques appelées « cadres » contenant plusieurs bouteilles reliées entre elles avec une seule sortie. Les cadres sont déchargés et déposés à la station-service. Ces cadres de bouteilles sont proposés, selon les fournisseurs, dans une gamme allant d'environ 8 kg à plusieurs dizaines de kilos d'hydrogène ;
- dans de grands cylindres, appelés aussi « tubes », sur une remorque contenant plusieurs centaines de kilos d'hydrogène (de 180 à 500 kg). Celle-ci est soit laissée sur site soit transférée ou dépotée, par le livreur, dans un réservoir fixe installé chez le client. Le réservoir peut être la propriété du fournisseur de gaz ou avoir été acheté par le client.

Les cadres ou cylindres ainsi livrés se connectent directement à la station-service d'hydrogène. La pression de remplissage standard des cadres est de 20 MPa (200 bar). Il existe aussi des cadres à 35 MPa (350 bar) et des développements sont en cours pour fournir une logistique à 50 MPa (500 bar) voire 70 MPa (700 bar).

1.1.3 - Stocker de l'hydrogène

L'hydrogène peut être stocké sous ses trois états : gazeux, liquide ou solide.

Stockage gazeux

C'est le type de stockage le plus fréquent et le plus simple puisque, d'une part, l'hydrogène est gazeux à tempéra-ture et pression ambiantes et, d'autre part, la production par électrolyse ou vaporeformage génère de l'hydrogène sous forme gazeuse. La masse volumique de l'hydro-gène étant faible (0,08 kg/m^3), ce gaz occupe alors un volume très important aux conditions atmo-sphé riques standard. On le comprime pour le manipuler plus facilement et surtout le transporter. Notons que les électrolyseurs performants produisent le gaz à plus de 3 MPa, ce qui, pour un stockage sur site, peut déjà s'avérer suffisant dans certaines applica-tions stationnaires. Quant aux bouteilles typiques de gaz industriels (50 litres), elles stockent environ 750 grammes d'hydrogène à 20 MPa, pression à laquelle l'hydrogène est transporté aujourd'hui. Côté applica-tions automobiles, le stockage doit être minimisé en termes d'encombrement, d'où des technologies de réservoirs plus élaborées permettant d'atteindre 35 MPa (23 kg/m^3) ou 70 MPa (42 kg/m^3). Ces pressions tendent à devenir les standards des réservoirs des premières générations de véhicules à pile à combustible commer-cialisés. Le stockage à 70 MPa semble être le meilleur compromis entre densité énergétique, flexibilité, sécurité d'emploi et coût. Pour d'autres applications embarquées (bus, véhicules utilitaires à prolongateurs d'autonomie…), la solution à 35 MPa est privilégiée ; elle est suffisante pour les cycles d'usages et beaucoup plus abordable, tant au niveau du coût des réservoirs des véhicules que de celui de la station-service. Dans les bateaux, où la contrainte de place peut être moindre, des réservoirs de 20 MPa sont envisagés.

Stockage liquide

La température de liquéfaction de l'hydrogène à pression atmosphérique est de -253 °C. À cette température, l'hydrogène a une masse volumique de 71 kg/m^3, ce qui peut paraître favorable, en particulier pour les véhicules. Mais cela impose des technologies cryogéniques qui demandent des investissements importants ; la solution hydrogène liquide semble abandonnée pour le stockage embarqué. Par contre, elle est utilisée de façon courante aux États-Unis, où de nombreux liquéfacteurs, hérités de la conquête spatiale, approvisionnent des stations-service.

Stockage solide

Appellation pratique pour le différencier des deux autres, il s'agit en réalité d'un abus de langage puisque les atomes d'hydrogène ne sont, en aucun cas, à l'état solide, mais capturés dans la structure atomique d'un matériau solide, un hydrure. Sous cette forme, le stockage s'effectue à basse pression (moins de 3 MPa) et à température ambiante ou légèrement supérieure. Selon les hydrures, la masse volumique de l'hydrogène peut atteindre jusqu'à 200 kg/m^3. La réaction d'absorption libère de la chaleur. En phase de déstockage, le réservoir d'hydrures est chauffé pour produire la réaction de désorption de l'hydrogène. Cette forme de stockage est relativement peu énergivore, même si elle requiert de la puissance thermique à la désorption. Elle est proposée aujourd'hui pour des applications stationnaires. Cependant, la lenteur de remplissage et de déstockage, la gestion thermique du réservoir et finalement le poids total du système la rendent peu praticable pour le moment pour des applications embarquées telles que l'automobile. Elle est toutefois déployée avec succès sur des véhicules plus petits (quadricycles), par exemple pour les dix véhicules du projet européen Mobypost (voir photo ci-dessous et encadré § Contexte). De nouvelles technologies de stockage avec des hydrures sous pression sont aussi en cours de développement.



Quadricycles à hydrogène expérimentés par La Poste dans le cadre du projet Mobypost



La Poste - Station de Luxeuil-les-Bains

Les trois systèmes coexistent. Il est intéressant de noter que, malgré des différences technologiques radicales, les énergies requises sont en définitive assez proches. Le type de stockage dépendra de l'usage envisagé et des contraintes spécifiques à chaque technique.

1.1.4 - Optimiser la logistique

Il n'y a pas de chaîne d'approvisionnement type. Pour chaque situation et chaque application visée, cela dépendra de :

- L'origine du gaz : fabriqué sur site (production locale grâce à un électrolyseur alimenté par des énergies renouvelables) ou acheté auprès d'un fournisseur (production sur un autre site, avec transport et mise à disposition dans plusieurs stations-service).
- La compression et le stockage : la quantité d'hydrogène à stocker, sa pression ainsi que la capacité de compression requise sur le site d'exploitation dépendent des besoins journaliers (nombre et types de véhicules à servir, fréquence et vitesse de remplissage), mais aussi des capacités d'approvisionnement en hydrogène (type de conditionnement ou cadence de livraison).

Les choix résulteront d'une analyse d'optimisation globale tenant compte de paramètres à la fois logistiques, techniques et économiques. Une analyse de coût total de possession (TCO ou Total Cost of Ownership) permet de déterminer, selon les objectifs de rentabilité visés sur une durée choisie, quel modèle privilégier et quels moyens financiers mettre en œuvre en termes d'investissements (Capex ou CAPital EXpenditures) et de dépenses d'exploitation (Opex ou OPerational EXpenditures).

L'aspect réglementaire est également à prendre en compte, puisqu'il peut influencer les délais et coûts de réalisation. Aujourd'hui, en France, il est surtout lié à la production ou non d'hydrogène sur site et à la quantité d'hydrogène stocké. Enfin, au-delà des considérations financières, les enjeux sociétaux, environnementaux et économiques sont à considérer : valorisation d'énergies renouvelables locales, présence d'un site de production d'hydrogène à proximité, réduction de l'impact carbone, propreté du centre-ville, développement de nouvelles activités, etc.

DEMAIN, DE NOUVELLES SOURCES D'HYDROGÈNE

Les grandes institutions de la recherche française, comme le CEA, le CNRS et l'IFPEN, tout comme de nombreux laboratoires ailleurs dans le monde (Etats-Unis, Chine, Allemagne, Japon, Corée du Sud), sont engagés dans des recherches à moyen ou long terme sur la production d'hydrogène par des bioprocédés dits de 3[e] génération :

- Les photolyses et photoélectrolyses de l'eau permettent de produire de l'hydrogène à partir de la lumière du soleil via des cellules photoélectrochimiques. Composées de semi-conducteurs, elles génèrent la tension nécessaire à la dissociation des molécules d'eau par absorption de la lumière. Tout comme l'électrolyse couplée à une sourced'énergie photovoltaïque, ces deux méthodes produisent un hydrogène bas-carbone. Elles sont bien adaptées aux applications de petites puissances ou en sites isolés. D'importants travaux de recherche sont en cours à travers le monde dans le but d'atteindre de bons rendements de conversion.

- Certaines bactéries sont capables de produire de l'hydrogène à partir de molécules organiques simples, telles que les sucres et les acides organiques, largement présents dans les déchets des industries agro-alimentaires. Cette réaction est provoquée par des enzymes spécifiques à ces bactéries.

  A l'instar de nombreuses espèces végétales aptes à produire de l'oxygène par photosynthèse, certaines microalgues et cyanobactéries possèdent la faculté de produire de l'hydrogène à partir d'eau et d'énergie solaire. Il s'agit d'une réaction réalisée en interaction avec la photosynthèse à l'aide d'une enzyme. Toutefois, cette dernière se retrouve rapidement inactivée par l'oxygène de l'air, rendant cette réaction très éphémère. De nombreuses recherches sont actuellement menées, notamment au CEA, afin de limiter la sensibilité de l'enzyme à l'oxygène.

- Dans les centrales solaires à concentration, à très haute température (plus de 2 000 °C), il est possible de réaliser la dissociation directe de la molécule d'eau en hydrogène et oxygène : c'est le cycle thermochimique. Il est aussi possible de décomposer l'eau en plusieurs étapes par réactions successives, en utilisant des sources de chaleur à moindre température (inférieure à 1 000 °C), moins gourmandes en énergie. Plusieurs équipes de chercheurs américaines, japonaises et françaises travaillent sur ce sujet, mais les verrous technologiques restent encore nombreux ; cette solution ne semble pas réaliste avant longtemps.

1.2 - Utiliser l'hydrogène pour les applications de mobilité électrique

1.2.1 - Technologies et architectures

La mobilité électrique n'est pas une invention récente. Depuis bientôt 200 ans, des prototypes de trains ou de voitures propulsés grâce à de l'électricité stockée dans des batteries ont existé à des stades plus ou moins avancés. Même si la technologie des batteries a fait d'énormes progrès au cours de la seconde moitié du XXe siècle, les véhicules électriques à batterie présentent des performances inférieures aux solutions thermiques en termes d'autonomie et de disponibilité (liée au temps de recharge). Pour certains profils d'usage, en milieu urbain ou périurbain notamment, ces performances sont néanmoins suffisantes pour répondre au besoin de mobilité.

Avec une pile à combustible hydrogène, la disponibilité et l'autonomie du véhicule électrique sont aussi prédictibles que pour des véhicules thermiques. Le temps de recharge (on parle aussi de ravitaillement ou remplissage) est de quelques minutes. L'autonomie est directement proportionnelle à la quantité de gaz embarqué : dans l'état actuel des technologies employées par les constructeurs automobiles, on considère qu'un kg d'hydrogène permet de parcourir environ 100 km. Cet ordre de grandeur n'est donné qu'à titre indicatif, il peut varier selon les véhicules et les usages.

Les technologies de stockage permettent aujourd'hui d'embarquer une quantité d'hydrogène pour un encombrement et un poids compatibles avec les exigences technologiques de l'automobile. Ainsi, pour une même autonomie (600 km), un système de stockage de 6 kg d'hydrogène à 70 MPa occupe un volume inférieur à 260 litres. Il est certes supérieur à celui d'un système de stockage d'essence (46 litres environ) mais nettement inférieur au volume que prendrait un système de batteries pour une autonomie équivalente (670 litres) (chiffres General Motors, 2012). Son poids est par ailleurs quatre fois moindre que celui des batteries pour les mêmes véhicules et cinq fois plus élevé que pour un véhicule essence ou diesel. Ce surpoids est, par ailleurs, en grande partie compensé par la légèreté de la motorisation électrique comparée à la motorisation thermique.

Les piles à combustible de type PEMFC (pile à membrane échangeuse de protons) répondent bien aux contraintes de nombreuses applications de transport de personnes et de marchandises :

- La gamme étendue de puissance électrique fournie (de l'ordre de quelques kilowatts (kW) à quelques centaines de kW) correspond à un panel de besoins allant du vélo électrique aux camions, engins de chantiers et bus, en passant par la berline familiale ou le véhicule urbain de livraison.
- L'encombrement et le poids d'une pile à combustible, selon sa puissance, sont compatibles avec les contraintes exigées pour le type de véhicule ciblé.
- Les cycles de démarrage et d'arrêt de la pile, ainsi que leur nombre, sont compatibles avec les usages des véhicules et leur durée de vie (actuellement de 3 000 à 5 000 heures selon les constructeurs, soit 300 000 km à 60 km/h de moyenne).
- L'énergie électrique, ainsi que la chaleur dégagée par la pile, alimentent aussi les autres équipements de bord (chauffage, climatisation, éclairage, tableau de bord et équipements électriques divers).

Ces piles à combustible sont technologiquement matures. Les études en cours portent sur la réduction du poids et de l'encombrement. Leur industrialisation aura aussi un impact substantiel sur la réduction des coûts, estimée à plus de 70 % par les constructeurs automobiles d'ici à 2020. Toyota, par exemple, a déclaré pouvoir atteindre une parité des coûts entre véhicules à hydrogène et véhicules thermiques dès lors que les fabrications en série seront de l'ordre de celles des véhicules hybrides actuels tels que la Prius.

Aujourd'hui, de nombreux véhicules ont dépassé le stade de l'expérimentation et du démonstrateur pour être commercialisés : ix35 Fuel Cell de Hyundai, Mirai de Toyota, FCX Clarity de Honda, Class B de Mercedes, Kangoo ZE-H2 de Symbio FCell, camion Maxity électrique H_2 de Renault Trucks (voir p.8), bus hydrogène de Van Hool, de Mercedes, etc.

1.2.2 - Différents types de véhicules à hydrogène pour les transports

Tous les véhicules, deux-roues motorisés, voitures, camions, bateaux, autobus, engins de chantiers, chariots élévateurs, peuvent passer à une motorisation électrique grâce à une pile à combustible et un réservoir dimensionnés pour l'usage recherché.

REPÈRES

- 1 CV = 736 W
- 1 kW = 1,36 CV
- Ainsi, la puissance électrique fournie par une pile à combustible de 10 kW équivaut à une puissance de 13,6 CV (chevaux vapeur) ; une pile à combustible de 80 kW correspond aux besoins en énergie d'une berline de 110 chevaux environ.

Le principe d'intégration de la pile dans le véhicule, notamment son degré d'hybridation, peut varier très largement selon les types de véhicules et les applications de mobilité visées : besoin d'autonomie, de puissance instantanée ou continue, nécessité d'alimenter les équipements de bord type climatisation, réfrigération, électrification de bord (voir schéma ci-dessous). L'hydrogène peut être la source d'énergie unique de propulsion et d'alimentation des équipements de bord. Il peut aussi ne fournir qu'une partie de l'énergie destinée à la propulsion : hybridation moteur électrique/moteur thermique à essence ou diesel ou hybridation batterie/pile à combustible. Enfin, dans certaines applications, les piles à hydrogène fournissent seulement de l'électricité auxiliaire : c'est le cas de l'aviation où elles servent d'auxiliaire de puissance (Auxiliary Power Unit) ou de moyen de déplacement sur les pistes (dit green taxiing).

A la sortie de la pile à combustible, une batterie peut servir de capacité électrique « tampon » entre la pile qui fournit un courant électrique de manière régulière, un moteur électrique qui consomme selon les besoins du véhicule et les sollicitations du conducteur (accélérations, décélérations). L'hybridation avec des supercapacités est aussi envisagée.

Tous les véhicules électriques peuvent être équipés, dès l'origine ou suite à une étude d'implantation spécifique, d'une pile à combustible, dont la puissance, couplée à la capacité des réservoirs, améliore l'autonomie et la disponibilité.

Un véhicule à hydrogène, au même titre que les autres véhicules, doit recevoir, de la part d'organismes d'homologation, une autorisation de circuler délivrée après avoir passé les tests nécessaires. Cette démarche est de la responsabilité du fabricant du véhicule. À l'échelle européenne, l'homologation obtenue dans un des pays de la communauté, par un organisme certifié, est valable pour les autres pays. Ce certificat d'homologation est nécessaire à l'immatriculation du véhicule et à l'obtention de la carte grise, ainsi qu'à son assurance. En France, l'immatriculation d'un véhicule à hydrogène ne présente pas de spécificité particulière.

1.2.3 - Déployer une infrastructure de recharge pour véhicules à hydrogène

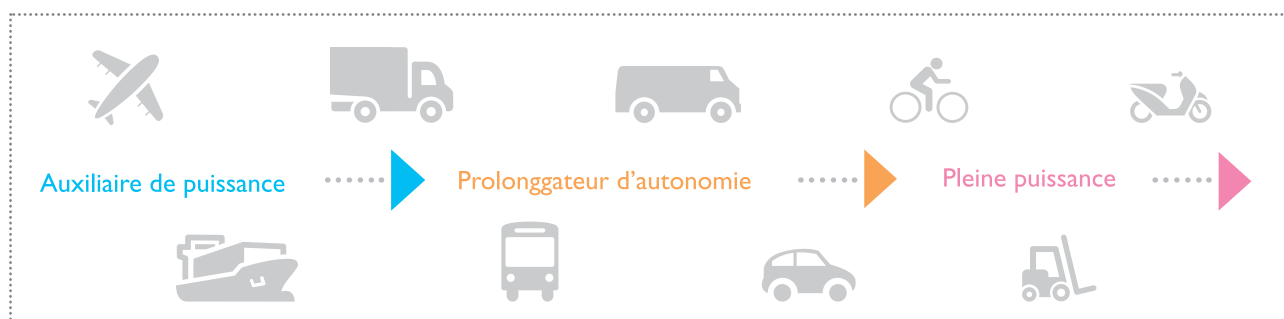
Le ravitaillement d'un véhicule en hydrogène s'effectue en quelques minutes auprès d'une station-service et ressemble beaucoup au « plein » des véhicules à essence, gasoil ou gaz.

Le site internet de TÜV SÜD recense les stations-service (4), publiques et privées, dans le monde. Début 2015, on en compte 150 en activité réparties aux États-Unis (Californie surtout avec son programme de réduction des émissions de CO_2 dans les transports), en Europe (Allemagne, Europe du Nord) et au Japon, très actif avec des constructeurs automobiles (Toyota, Nissan, Suzuki, Honda) qui investissent dans cette technologie. Quelques villes européennes ont été équipées de stations-service, notamment lors du programme de recherche et démonstration européen CHIC (Clean Hydrogen In European Cities) de bus urbains à hydrogène, par exemple à Londres, Hambourg ou Berlin[(5)].

Début 2015, en France, on ne trouve pas encore de station-service hydrogène ouverte au public, c'est-à-dire, à l'instar des stations-service classiques, un dispositif équipé d'un système de mesure de la quantité d'hydrogène distribuée et d'une interface de paiement. Un déploiement est envisagé à partir de 2017 en lien avec le programme européen HIT (Hydrogen Infrastructure for Transport) qui préfigure les « corridors » sur lesquels pourraient être implantées les premières stations-service (voir figure ci-dessous). Elles pourraient délivrer quotidiennement plusieurs centaines de kilogrammes d'hydrogène, sur le modèle des stations-service actuelles. Ce déploiement serait synchronisé avec l'arrivée prévue des premiers véhicules particuliers roulant à l'hydrogène.

La capacité de la station-service sera directement liée au nombre de véhicules qui viendront s'approvisionner. Installer une station dans une zone où des véhicules à hydrogène opèrent régulièrement et de manière prévisible permet, par mutualisation de l'équipement, de réduire les coûts pour chaque opérateur de flotte.

DEGRÉS D'HYBRIDATION DE LA PILE À COMBUSTIBLE
SELON LES TYPES DE VÉHICULES ET LES FONCTIONS RECHERCHÉES



(4) http://www.H2stations.org
(5) Le programme CHIC prend la suite des programmes CUTE et HyFLEET-CUTE (http://chic-project.eu).

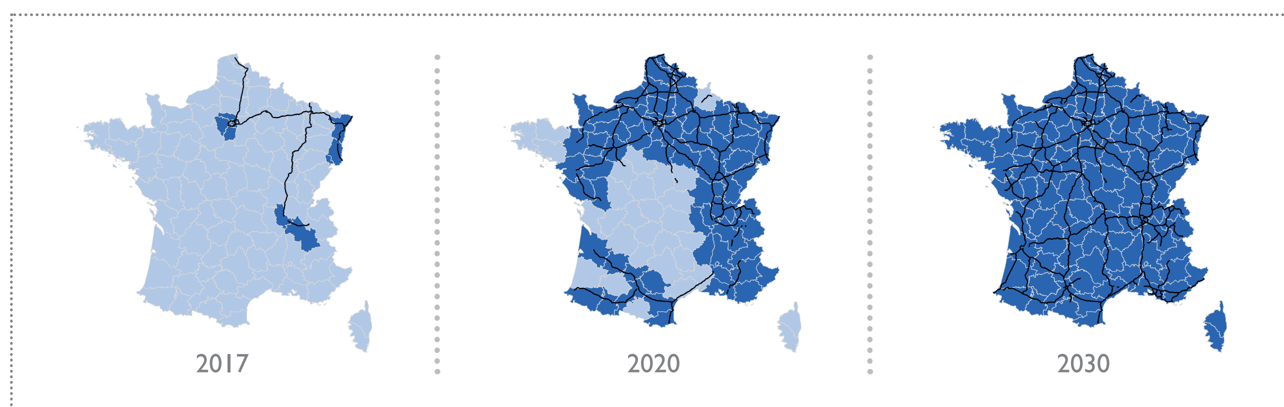
Cela permet d'amorcer l'écosystème mobilité hydrogène. La France compte actuellement quatre stations de distribution d'hydrogène : elles sont installées sur des sites industriels, dans des entrepôts, des plateformes logistiques, des zones industrielles. Elles servent à approvisionner les véhicules du site en question ou spécifiquement autorisés par un accord entre l'exploitant de la station et l'opérateur des véhicules. Celle de Luxeuil-les-Bains (Haute-Saône) a une capacité de 15 kg/jour, celle de Saint-Lô (Manche) de 20 à 30 kg/jour, celles de Lyon et Grenoble du projet HyWay auront des capacités de 40 à 45 kg/jour.

CHARIOTS ÉLÉVATEURS

Plusieurs milliers de chariots élévateurs équipés d'une pile à combustible et fonctionnant avec de l'hydrogène gazeux sont actuellement déployés à travers le monde dans des entrepôts. Ils constituent à ce jour la plus importante flotte de véhicules à hydrogène. Par rapport à leurs équivalents équipés de batterie, ils offrent une plus grande autonomie, un meilleur rendement dans la durée et un temps de recharge réduit (quelques minutes au lieu de plusieurs heures pour les chariots élévateurs à batteries). Ils permettent également un gain d'espace et de coût en supprimant la nécessité de batteries de rechange et d'un espace de stockage adapté (salle de pose/dépose des batteries sur les chariots) et évitent de nombreuses manutentions de packs de batteries et les risques associés (projections d'acide).

En 2015, on compte aux États-Unis plus de 5 200 chariots élévateurs, chez des utilisateurs comme Coca-Cola, BMW, l'US Army ou Wal-Mart. En Europe, leur déploiement est soutenu par le programme HyLift et HAWL du FCH-JU (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking), un partenariat public-privé, et en France par Oséo. Une centaine de chariots élévateurs sont aujourd'hui déployés en Europe. En France, des déploiements sont en cours, notamment sur le site d'Ikea à Saint- Quentin-Fallavier, de FM Logistic à Neuville-aux-Bois et de Prélodis à Saint-Cyr-en-Val.

SCHÉMA DE DÉPLOIEMENT POSSIBLE DE STATIONS-SERVICE HYDROGÈNE SUR LE TERRITOIRE FRANÇAIS



Source : Etude Mobilité Hydrogène France

HYWAY : LES PREMIERS CLUSTERS FRANÇAIS

Le concept de clusters préconisé par le consortium Mobilité Hydrogène France (cf. § Contexte) trouve sa première illustration dans le projet HyWay, coordonné par le pôle de compétitivité Tenerrdis et conjointement soutenu par l'Etat (ADEME, DREAL) et le Conseil régional de Rhône-Alpes. L'objectif du projet est d'aider au déploiement et à l'expérimentation en conditions réelles d'utilisation d'une flotte de 50 véhicules électriques à hydrogène autour de stations-service implantées à Lyon et à Grenoble. Elles sont accessibles à la trentaine d'entreprises et de collectivités engagées dans le projet en se portant acquéreur d'un ou plusieurs véhicules (notamment DHL, DREAL, La Poste, Linde, Cetup, CNR, CEA, Crédit Agricole du Sud-Est…). Ce dispositif permet de tester en grandeur réelle les interactions stations/véhicules et d'étudier la faisabilité et la viabilité économique de tels déploiements de véhicules professionnels.

2 - Les spécificités de l'hydrogène

2.1 - Propriétés physiques et chimiques

Découvert au XVIIIe siècle par Henry Cavendish, l'hydrogène a été nommé ainsi quelques années plus tard par Antoine Laurent de Lavoisier pour sa propriété à générer de l'eau par réaction avec l'oxygène. L'hydrogène est incolore et inodore, et se présente sous forme gazeuse à pression et température ambiante.

L'hydrogène est le premier atome du tableau périodique des éléments. Sa petite taille, associée à une très faible viscosité, rend ce gaz apte à fuir très facilement en présence de défauts d'étanchéité. D'une très faible densité et possédant un fort coefficient de diffusion, il a également naturellement tendance à s'élever et à se mélanger à l'air ambiant. A titre de comparaison, il est huit fois plus léger et possède un coefficient de diffusion quatre fois plus grand que le méthane.

Ainsi, en espace libre, il s'échappe et se dilue très rapidement sans former de poche d'accumulation. En espace confiné, une accumulation reste possible, comme pour les autres gaz. Dans le cas de l'hydrogène, elle se formera en règle générale en point haut.

Comparé au méthane, l'hydrogène possède une énergie deux fois et demie plus importante par unité de masse, mais trois fois et demie plus faible par unité de volume. Autres différences : il possède une plus large plage d'inflammabilité, comprise entre 4 % et 75 % dans l'air, contre 5,3 % et 17 % pour le méthane. Son énergie minimale d'inflammation est également plus faible, elle atteint une valeur dix fois moindre à la stœchiométrie[(6)], c'est-à-dire lorsque le mélange est à 30 % en volume d'hydrogène dans l'air. Le tableau qui suit indique quelques caractéristiques physiques et chimiques de l'hydrogène gazeux, du méthane et des vapeurs d'essence :

QUELQUES PROPRIÉTÉS PHYSICOCHIMIQUES DE L'HYDROGÈNE GAZEUX, DU MÉTHANE ET DES VAPEURS D'ESSENCE (À 0,1 MPA, 20 °C)

	Hydrogène H_2	Méthane CH_4	Vapeur d'essence
Masse volumique (kg/m³)	0,08	0,7	4,4
Coefficient de diffusion dans l'air (cm²/s)	0,61	0,16	0,05
Température d'auto-inflammation dans l'air (°C)	585	537	228-501
Limites d'inflammabilité dans l'air (% vol.) aux conditions normales de température et de pression	4-75	5,3-17	1-7,6
Limites de détonation dans l'air (% vol.)	13-65	6,3-13,7	1,1-3,3
Énergie minimale d'inflammation pour un mélange air/combustible dans les proportions stœchiométriques (mJ)	0,02 (29,5% H_2 dans l'air)	0,29 (9,5% CH_4 dans l'air)	0,24 (1,8% de vapeur d'essence dans l'air)
Énergie explosive (kg TNT/m³)	2,02	7,03	44,22
Vitesse de combustion dans l'air (m/s)	2,70	0,37	0,30
Vitesse de détonation (m/s)	1500-2100	1400-1800	1400-1700
Température de flamme (°C)	2045	1875	2200

Source : L'hydrogène, carburant de l'après-pétrole ?, IFPEN, CEA, cf. § 6.4.

(6) Proportion de réactifs consommés quand une réaction chimique est complète (tous les réactifs sont transformés en produits). Dans le cas de la combustion de l'hydrogène avec l'air, cela signifie que l'ensemble des molécules de ces deux gaz se transforme en eau.



Lieutenant-colonel François Laumann
SDIS 04 / Directeur scientifique et technique du projet européen HyResponse.

« Aujourd'hui, il faut travailler sur l'acceptation sociétale de l'hydrogène : démontrer, par de la pédagogie et au travers de démonstrateurs, que l'hydrogène n'est pas aussi dangereux que le grand public l'imagine. Il faut mettre en place des mesures de sécurité et, en situation dégradée ou d'intervention, savoir comment intervenir. La sécurité doit être prégnante. A chaque énergie, ses problèmes et sa stratégie d'intervention. »

NOTE D'INFORMATION OPÉRATIONNELLE « RISQUE HYDROGÈNE »

En 2013, la Direction générale de la sécurité civile et de la gestion des crises (DGSCGC) a émis une note d'information opérationnelle relative à l'intervention sur les installations d'hydrogène et les risques liés (note téléchargeable, cf. § 6.4), à destination de l'ensemble des Services départementaux d'incendie et de secours (SDIS) de France pour leur permettre d'appréhender efficacement ces nouvelles technologies. Plus de 12 SDIS ont apporté leur concours et un référent par zone de défense et de sécurité civile a été identifié.

Cette note « a pour objet de proposer aux sapeurs-pompiers une analyse des risques, en particulier pour ce qui relève des nouveaux moyens de stockage haute pression et de nouvelles utilisations de l'hydrogène, et de définir des stratégies globales d'intervention destinées à réduire ou à inhiber ces risques, de manière pérenne ».

2.2 - Risques spécifiques

L'emploi de l'hydrogène, comme tout vecteur énergétique, comporte des risques. Les moyens de prévention et de maîtrise de ces risques dépendront de la configuration concrète de mise en œuvre ou d'emploi de ce gaz : type d'équipements, environnement d'usage, contraintes et sollicitations externes… Le présent guide s'intéresse spécifiquement aux véhicules équipés de pile à hydrogène et aux stations-service délivrant de l'hydrogène. Le volet production d'hydrogène fait l'objet d'un autre guide d'information. En cas de fuite, l'hydrogène présente des risques spécifiques de différents niveaux de criticité.

Dans le cadre de déploiement de stations et de flottes de véhicules, on peut considérer des risques de niveaux de criticité élevés (incendie, explosion) et des risques de niveaux de criticité a priori faibles (anoxie, risque acoustique, risque cryogénique).

Les fuites peuvent être la conséquence de divers phénomènes : raccords défaillants, perméation, dégradation des matériaux sous l'effet de l'hydrogène. Celui-ci peut en effet réagir avec certains matériaux (aciers, polymères) de par sa nature chimique, sa petite taille et son fort coefficient de diffusion qui peuvent conduire à plusieurs phénomènes :

- Diffusion dans les polymères.
- Fragilisation du métal : dissociation du dihydrogène et transport des atomes d'hydrogène par l'intermédiaire de défauts de structure du métal (dislocation) puis recombinaison, mais pas forcément sous forme d'hydrogène (avec du manganèse ou du soufre par exemple).
- Attaque de l'acier par l'hydrogène à haute température et recombinaison avec le carbone pour faire des poches de méthane.

Toutefois, ces phénomènes sont bien connus et pris en compte par les industriels, qui utilisent de l'aluminium, de l'acier faiblement allié ou inoxydable et des matériaux polymères adaptés pour la distribution et le stockage du gaz.

Le cas de la fuite due à une rupture d'un flexible d'hydrogène sous pression est abordé dans le chapitre consacré aux stations de distribution (cf. § 3.2).

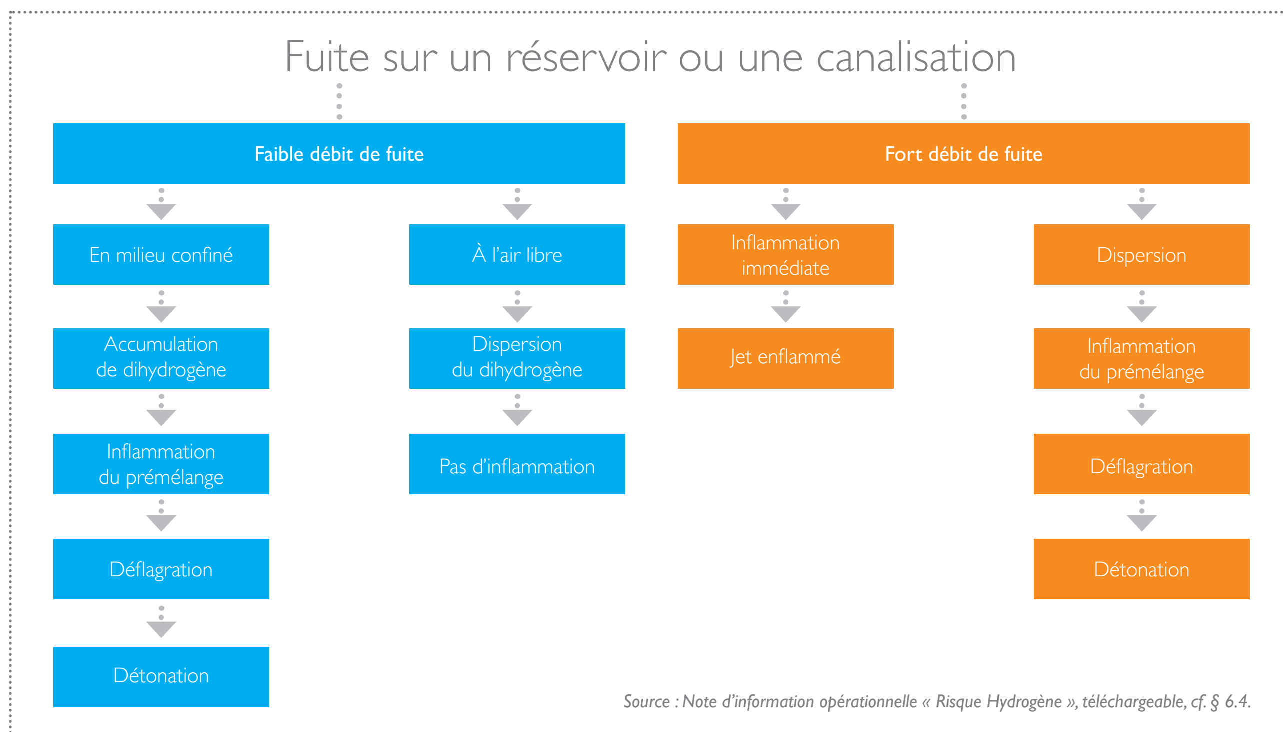
L'anoxie

Comme pour tous les gaz, l'augmentation de la concentration en hydrogène entraîne la diminution du taux d'oxygène : cela peut provoquer une asphyxie (anoxie). Ce phénomène risque de se produire principalement dans des milieux confinés, en commençant par les parties hautes. Grâce à des dispositifs de surveillance du taux d'hydrogène dans l'air (explosimètres) associés à des dispositifs d'alarmes ou de coupures d'alimentation en hydrogène, la criticité de ce risque est très faible.

Le risque acoustique

Une fuite d'hydrogène survenant sur une canalisation ou sur une enceinte de stockage peut générer un bruit très important en fonction de la pression et de la vitesse d'échappement. Des essais ont montrés qu'un cadre ouvert d'azote à 20 MPa, équipé d'un orifice de sortie de lyre de 4 mm fait un bruit de 130 dB (équivalent à un avion au décollage à 100 m environ). L'hydrogène étant une molécule plus petite, le bruit sera toutefois moins important. Il convient de s'éloigner pour s'affranchir des conséquences. Ce risque est considéré de criticité très faible.

CONSÉQUENCES POSSIBLES D'UNE FUITE D'HYDROGÈNE



Source : Note d'information opérationnelle « Risque Hydrogène », téléchargeable, cf. § 6.4.

Les risques liés à l'utilisation de l'hydrogène liquide
L'hydrogène liquide étant à la température de -253 °C, il présente des risques spécifiques :

- Le risque cryogénique : le contact avec la peau s'apparente à une brûlure thermique. Il est primordial de porter des équipements de protection individuelle adaptés (gants, tablier cryogénique, lunettes).
- Le risque de vaporisation : à pression atmosphérique, un litre d'hydrogène peut se vaporiser quasi instantanément en 780 litres de gaz. Les explosimètres, associés à des dispositifs d'alarmes ou de coupures d'alimentation en hydrogène, permettent de limiter ce risque de présence d'un nuage conséquent d'hydrogène, potentiellement explosif.

Le risque d'inflammation et d'explosion
C'est le principal risque de l'hydrogène gazeux, en raison de sa plage d'inflammabilité et de son énergie minimale d'inflammation. Différents scénarios accidentels sont possibles, tous liés à une fuite d'hydrogène et à son mélange à l'oxygène. Ils peuvent être recensés en fonction de paramètres tels que le débit, la vitesse à la brèche, le degré de confinement, le type et l'instant d'inflammation.

On en distingue quatre dont les conséquences sont les suivantes :

- Le jet enflammé, ou feu torche, se produit en cas d'inflammation immédiate d'une fuite à fort débit. Le risque est essentiellement lié au flux thermique de la flamme. Celle-ci est quasi invisible en milieu propre, mais se colore par combustion des poussières environnantes et du rayonnement des vapeurs d'eau générées par la combustion. Elle s'accompagne d'un bruit très important. Si sa température est proche de celle des autres combustibles comme l'essence, elle rayonne toutefois moins, limitant le risque de propagation en cas d'incendie par effet de rayonnement thermique. La longueur de la flamme et le flux rayonné dépendent du débit massique et sont fonction de la pression du réservoir et du diamètre de fuite (cf. Note d'information opérationnelle « Risque hydrogène », § 6.6). Les températures de flamme hydrogène et méthane sont respectivement de 2 390 K (2 117 °C) et 2 226 K (1 953 °C).

Dans le cas d'une fuite de fort débit, ou de petit débit dans un milieu confiné, l'explosion est possible en présence d'une source d'inflammation. Elle correspond à une libération soudaine d'énergie, entraînant la propagation d'un front de flamme et d'une onde de surpression. On distingue deux types d'explosion aux effets différents :

- la déflagration : le front de la flamme se déplace à une vitesse subsonique, engendrant une augmentation continue de la pression dans le nuage gazeux ;
- la détonation : la vitesse de propagation de la flamme est supersonique. La surpression a lieu de manière brutale engendrant une onde de choc. La détonation est favorisée lorsque l'énergie d'inflammation est importante et en présence d'obstacles, générant des turbulences, et une accélération du front de flamme[7].

(7) Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre, INERIS téléchargeable (cf. § 6.4).

C'est elle qui aura les effets potentiellement les plus graves sur les personnes et les biens. La vitesse de détonation est de 1 980 m/s, comparable à celle du méthane dans l'air (1 800 m/s). La vitesse fondamentale de flamme est de 2,1 m/s (0,4 m/s pour le méthane) ;

- En cas de fuite à faible débit à l'air libre, grâce à sa légèreté et son fort coefficient de diffusion, l'hydrogène se mélange rapidement dans l'air, ce qui limite la formation d'atmosphères explosives.

L'éclatement d'un réservoir sous pression
Par nature, un réservoir contenant de l'hydrogène sous haute pression, que ce soit celui d'une station ou d'un véhicule, est sujet à un risque d'explosion. Les dispositifs de protection spécifiques sont décrits dans les chapitres respectifs (cf.§ 3.2 et § 4.1.3.4).

La maîtrise de ces différents risques passe par la définition d'objectifs de sécurité dès la conception des systèmes utilisant de l'hydrogène. Cela consiste, pour tout système, à inclure tous dispositifs destinés à éviter les fuites, puis à limiter au maximum les quantités relâchées si une fuite venait malgré tout à se produire, afin de prévenir et de façon redondante tout risque de formation d'un mélange potentiellement déflagrant et a fortiori détonant.

Cette prévention passe par des choix technologiques sur le matériel utilisé (compatibilité des matériaux, types de raccords), ainsi que par des choix de conception (section des tuyauteries, pressions utilisées…). Elle passe enfin par une exigence de ventilation et d'un milieu adapté à l'hydrogène (zonage ATEX[8]) dans toutes les configurations possibles, y compris accidentelles, afin d'assurer l'impossibilité d'une accumulation d'hydrogène relâché.

2.3 - Principes généraux dans la conduite de projets de mobilité hydrogène

2.3.1 - Prendre en compte la sécurité dès le départ

Comme dans toute opération impliquant un objectif de maîtrise des risques, le management par la sécurité doit être exhaustif et cohérent. Il comporte les composantes suivantes :

- la définition du risque acceptable par rapport à l'objectif de sécurité ;
- les textes existants : réglementations, directives, guides de bonnes pratiques et normes ;
- les études à conduire ;
- la formation des personnels ;
- les services d'intervention ;
- la politique de maintenance.

La sécurité d'un équipement s'inscrit dans une démarche de sûreté de fonctionnement tout au long du cycle de vie du système, y compris dans le produit utilisé par l'usager. Cette démarche se fait au travers de différents outils. Elle a pour objectif de contrôler les défaillances. L'essentiel des études de sureté de fonctionnement sont réalisées pendant la phase de conception du système. Cette partie est de la responsabilité de l'industriel fournissant l'équipement, mais il appartient à l'usager ou maître d'ouvrage d'exiger toutes les preuves de bonne conception.

Les constructeurs de véhicules à hydrogène réalisent une analyse globale de sûreté de fonctionnement du système hydrogène et de son interaction avec le véhicule et son environnement. Des points clés de l'analyse de sureté de fonctionnement sont exigés dans la démarche d'homologation d'un véhicule, basée notamment sur les réglementations spécifiques aux véhicules électriques (règlement R100) et aux véhicules hydrogènes. Concernant ces derniers, le règlement CE n° 79/2009 du Parlement et du Conseil européens, adopté le 14 janvier 2009, et sa directive d'application n° 406/2010 de la Commission européenne du 26 avril 2010 fixent le cadre à appliquer (cf. § 4.1.4.2).

Dans le cas des stations, en France, en l'absence d'une réglementation spécifique, le maître d'ouvrage ou l'exploitant doivent s'assurer auprès du fournisseur de la conformité de leur produit aux normes, protocoles, directives applicables tels que présentés dans ce guide (cf. § 3.3.2). Ils doivent également en tenir compte dans la définition du cahier des charges de l'implantation de la station. L'analyse de risques fait partie des outils destinés à déterminer quels seront les éléments de sécurité à mettre en place pour assurer une exploitation sécuritaire.

Au niveau européen, les stations-service distribuant, en extérieur, de l'hydrogène gazeux utilisé comme carburant par des véhicules terrestres doivent être conformes à la norme EN correspondante, en cours de finalisation. En attendant, la directive sur le déploiement d'une infrastructure pour carburants de substitution fait référence à trois normes internationales (ISO 20100, ISO 14687, ISO 17268) :

- Conformité avec les spécifications techniques de la norme ISO/TS 20100:2008 pour les stations-service distribuant de l'hydrogène gazeux.

(8) La directive ATEX (Atmosphère explosive) définit trois zones où peuvent se former des atmosphères explosives (mélange avec l'air de substances inflammables – gaz, vapeurs, brouillards ou poussières) : la zone 0, où l'atmosphère explosive est permanente ou pendant de longues périodes en fonctionnement normal ; la zone 1, où elle est présente occasionnellement en fonctionnement normal ; et la zone 2, où elle est présente accidentellement, en cas de dysfonctionnement, ou de courte durée.

- Conformité avec les spécifications techniques de la norme ISO 14687-2 pour la pureté de l'hydrogène distribué par les stations-service.
- Conformité avec les protocoles de remplissage de la norme ISO 20100 pour les véhicules utilitaires légers utilisant de l'hydrogène gazeux, pour ce qui concerne les processus et équipements de remplissage (borne de distribution, flexible, pistolet, etc.).
- Conformité avec la norme ISO 17268 relative aux dispositifs de raccordement pour le ravitaillement des véhicules terrestres en hydrogène gazeux (connecteurs des véhicules).

2.3.2 - Former les acteurs du projet

La formation est essentielle à tout projet de mobilité hydrogène, comme le nécessite l'introduction de toute nouvelle technologie auprès d'utilisateurs non connaisseurs. Aujourd'hui, seuls quelques équipementiers assurent des formations, dispensées directement à leurs clients, spécifiquement sur leurs produits et matériels afin d'en garantir le fonctionnement en toute sécurité.

Des modules généraux de formation, abordant les problématiques de sécurité, devront être organisés et planifiés. Ces formations, qui pourront intervenir en amont du projet de déploiement, pourront aborder l'hydrogène (production, stockage, applications), ses spécificités (caractéristiques physiques et chimiques), les risques liés à son utilisation, les mesures de sécurité à mettre en œuvre (normes et réglementation). Comprendre le circuit de l'hydrogène à l'intérieur d'une station-service ou dans un véhicule, les sécurités mises en place, leur rôle dans la sécurité de l'application est également nécessaire à la bonne compréhension des enjeux. Ce guide propose une première approche de ces problématiques. Une formation de quelques heures permet en général de s'approprier les principales connaissances à acquérir avant de démarrer et d'évaluer les compétences et les moyens qu'il faudra mettre en œuvre.

Il est important d'associer les personnes qui seront au contact direct de l'application : chauffeurs, livreurs, manutentionnaires, usagers, riverains… Selon des études d'opinion récentes réalisées par Air Liquide, moins de 5 % du grand public aurait des a priori négatifs sur l'hydrogène. Cependant, dans un souci de pédagogie, il est toujours utile de préciser quels sont les points forts de l'hydrogène, ses avantages par rapport à d'autres solutions énergétiques, les risques et la façon de les gérer. La démarche tient à la fois de la communication et de la formation et constitue une étape d'acceptation du projet par ceux qui en seront, selon leur rôle, partie prenante.

Les premiers retours d'expérience, liés notamment aux projets MOBILHyTEST et Mobypost (cf. § Contexte), montrent qu'une présentation d'environ une journée est suffisante pour soulever des questions et y apporter les réponses. Des outils pédagogiques ont été développés par le FCH-JU via le projet européen HyFacts(9), par Alca Torda Applications et Mouthon Formation : une maquette du cycle de l'hydrogène, ainsi que des vidéos réalisées à l'aide de caméras thermiques pour comparer les feux de réservoirs GPL, méthane, hydrogène et visionner des procédures d'intervention sur feux d'hydrogène.

2.3.3 - Travailler avec la sécurité civile et les sapeurs-pompiers

Les services d'incendie et de secours sont en cours de formation sur les risques liés à l'hydrogène. En mars 2014, la première session de formation aux « Interventions d'urgence sur véhicules à énergie alternative » a eu lieu au Centre de formation des sapeurs-pompiers de la Vienne. Cette formation, créée par le SDIS 86 en partenariat avec le SDIS 44, a permis de former des sapeurs-pompiers de plusieurs départements. Au fur et à mesure du déploiement des stations et des flottes de véhicules, la formation se poursuit. La note d'information opérationnelle « Risque hydrogène » (cf. encadré § 2.1), rédigée en 2013, est un document de référence. Une nouvelle note est en préparation sur l'ensemble des véhicules à énergie alternative.

Dans le cadre du programme européen HyResponse (cf. § 6.6), l'Ecole nationale supérieure des officiers de sapeurs-pompiers (ENSOSP), basée à Aix-en-Provence, développe des outils pédagogiques dédiés à l'enseignement du risque hydrogène à l'usage des primo-intervenants, des exploitants et des autorités administratives. Il s'agit, d'une part, de formations théoriques sur les caractéristiques de l'hydrogène, les normes existantes, le parc de véhicules fonctionnant à l'hydrogène et, d'autre part, de formations pratiques avec des exercices sur simulateur en réalité virtuelle et des démonstrateurs réels.

Enfin, des formations spécifiques sont à prévoir pour les utilisateurs des véhicules, les employés des stations ainsi que les responsables de la sécurité des sites quand ils existent. Elles sont assurées, en général, par le fabricant des véhicules et l'installateur de la station. Une formation de quelques heures permet de présenter les étapes de l'automate de remplissage et les outils de surveillance de la station.

(9) HyFacts est un projet européen de recherche, financé par le FCH JU, destiné à concevoir et diffuser des formations pour les gestionnaires des risques et les responsables de la sécurité publique. Le but est de leur permettre de juger, en toute connaissance de cause, des aspects sécurité des dossiers de mise en place d'installations hydrogène qui leurs sont soumis.

3 - La station-service de distribution d'hydrogène

3.1 - Dispositifs opérationnels de la station-service

La station-service est entendue ici au sens de la zone occupée par les dispositifs opérationnels complétée des aires de circulation. Ces dispositifs intègrent, entre autres, éventuellement la production locale d'hydrogène, le stockage, la compression et la distribution de l'hydrogène aux véhicules. Toutefois, même si les dispositifs opérationnels sont identiques d'un point de vue fonctionnel, on trouve des implantations, agencements et architectures variés, soit de type monobloc, soit composés de plusieurs modules. La borne de remplissage peut être séparée des autres modules.

La station-service hydrogène est composée (voir schéma ci-contre) :

- d'une source d'hydrogène, ici des cadres de bouteilles (1). L'hydrogène peut aussi être approvisionné par une remorque à tubes ou par un gazoduc d'hydrogène. Enfin, il peut être produit localement par électrolyse ou par reformage de gaz, et être acheminé par un gestionnaire de réseau ;
- d'une unité de compression (2). Le compresseur peut être simple, multiétage ou sous la forme d'un groupement de compresseurs en cascade, en fonction des pressions d'alimentation des sources et des pressions requises ;
- d'un stockage intermédiaire dit stockage tampon (aussi appelé buffer), à haute pression, entre 45 et 100 MP a (3). Cela permet un remplissage rapide des réservoirs des véhicules à 35 ou 70 MPa ;
- éventuellement d'une unité de refroidissement de l'hydrogène (4 et 6). Selon les vitesses de remplissage visées, le groupe froid et l'échangeur sont requis pour la distribution d'hydrogène à 70 MPa ;
- d'une borne de distribution et de son pistolet (5). C'est ce que manipule l'opérateur comme dans une station de carburants usuelle ;
- d'une armoire de gestion générale de la station (7) ;
- de nombreuses tuyauteries, vannes, actionneurs et détecteurs.

3.2 - Points clés liés à la sécurité

Une station-service hydrogène est gérée avant tout par l'exploitant du site qui est responsable de sa mise en place et du respect des règles de sécurité. La maîtrise des risques de l'installation dépend de sa configuration et de l'environnement immédiat (présence d'installations à risques à proximité comme un dépôt de combustible, public au voisinage, circulation, etc.). Les risques sont identifiés et gérés par des dispositifs de sécurité, notamment issus des préconisations de l'analyse de risques. Les zones à risques doivent être clairement identifiées.

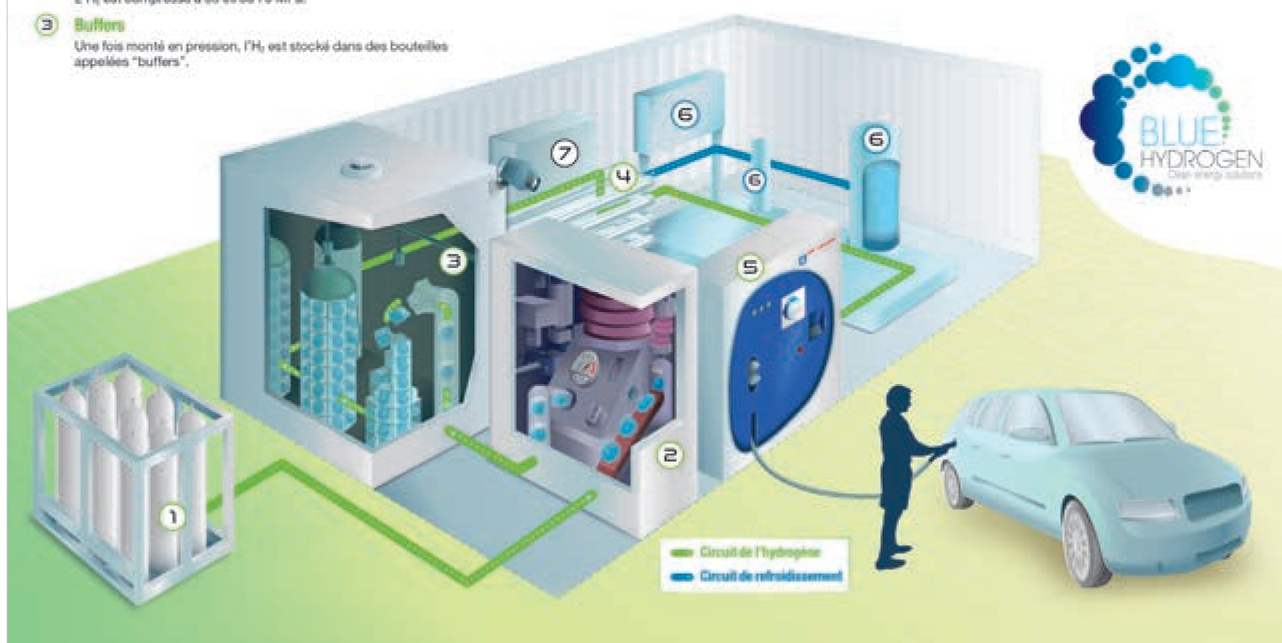


Station de Freiburg



© Crédit photo SEM EVEER'HY'PÔLE - Circuit d'Albi

Station-service hydrogène d'Albi, sur le circuit automobile d'EVEER'HY'POLE





© D.Daguier

Station hydrogène de Saint-Lô

3.2.1 - Zone de stockage de l'hydrogène source

Dans le cas le plus courant d'approvisionnement, en cadres de bouteilles, le risque principal est lié à la manipulation des emballages lors des ravitaillements par les fournisseurs d'hydrogène et aux opérations de connexion et de déconnexion (pour remplacer les cadres vides par des pleins). La zone de stockage doit être clairement identifiée et l'échange des cadres doit faire l'objet d'un protocole de livraison entre l'opérateur de la station, le fournisseur de gaz et la société de livraison le cas échéant.

Lors de la déconnexion et de la reconnexion des cadres aux lignes d'alimentation gazeuses de la station, de petites quantités d'hydrogène doivent être purgées des flexibles vers des évents appropriés. L'hydrogène étant très volatil, il se diffuse très rapidement dans l'air ; il n'y a pas de risque de formation d'atmosphère explosive si l'on effectue des purges de courtes durées. Cependant, conformément à la réglementation, une zone ATEX doit être définie au niveau des évents lors de ces dégazages (zone 1, car présence occasionnelle en fonctionnement normal).

Les risques de chocs des cadres contre certains éléments lors de l'approvisionnement sont possibles. Les chauffeurs des fournisseurs de gaz étant des professionnels formés et habilités par les sociétés de gaz industriels, ces accidents restent néanmoins rares.

Afin de prévenir le risque lié à la rupture d'un flexible sous pression, les flexibles de liaison entre les cadres de stockage et les lignes fixes d'alimentation de la station sont munis de câbles « antifouets ». De plus, pour prévenir tout risque de rupture du flexible lors de la manipulation du cadre, celui-ci peut aussi être muni d'un câble antiarrachement, qui permet de désolidariser la borne de distribution du flexible d'alimentation en hydrogène dans le cas où le véhicule démarrerait le pistolet encore connecté. Des solutions techniques combinent les deux fonctions. Pour prévenir le risque de rupture du flexible, celui-ci doit être remplacé selon la préconisation du fournisseur.

Enfin, les structures métalliques (cadres ou autres solutions de stockage) doivent être mises à la terre commune avant connexion du flexible de manière à réaliser la parfaite équipotentialité des masses et donc éviter les décharges électrostatiques, sources potentielles d'ignition.

3.2.2 - Zones de compression et de stockage tampon

Le compresseur étant une machine avec des pièces mobiles, il peut être la source de fuites d'hydrogène. Mais le risque principal est une aspiration d'air en entrée du compresseur, générant un mélange air-hydrogène, pouvant éventuellement provoquer une détonation.

À ce jour, l'accidentologie rapporte des défaillances sur des compresseurs de station hydrogène, mais n'ayant pas engendré d'incident majeur (source : bases de données Aria et H2LL).

3.2.3 - Borne de recharge

Cet équipement sert à faire un plein d'hydrogène. La manipulation du pistolet et l'opération de remplissage du réservoir du véhicule présentent des risques spécifiques, à maîtriser.

Après arrêt du véhicule, déblocage de la trappe de carburant, éventuellement mise à la terre puis raccordement du pistolet, l'utilisateur peut lancer l'opération de remplissage, gérée en totalité par l'automate de la station : du test d'étanchéité du flexible de distribution à la surveillance de la montée en pression jusqu'à la dépressurisation finale du flexible. Cette dernière opération pourra générer l'évacuation d'hydrogène en faible quantité vers des évents prévus à cet effet.

Au cas où le pistolet est mal positionné, celui-ci demeure étanche et l'hydrogène reste confiné dans le flexible. Si le véhicule bouge avec le pistolet de remplissage verrouillé au réservoir du véhicule, un dispositif antiarrachement désolidarise le pistolet et son flexible de la borne de distribution, sans fuite tant du côté de la borne que de celui du pistolet.

La sécurité des opérations liées à l'utilisation du pistolet et de son flexible est très importante (cf. encadré ci-dessus). A titre d'exemple, certains opérateurs gaziers implémentent différents contrôles lors du remplissage du réservoir d'un véhicule :



Borne de recharge



Semi-remorque à tubes pour le transport d'hydrogène gazeux comprimé

- Avant le remplissage, un test d'étanchéité du flexible est effectué, le pistolet étant verrouillé à l'embout du réservoir du véhicule.
- Pendant le remplissage, l'automate mesure la pression et la température. Si une anomalie est détectée, telle qu'une brutale chute de pression signe d'une rupture du flexible ou d'une grosse fuite, l'automate arrête le remplissage et dépressurise le flexible. Notons que le monitoring des paramètres de remplissage permet de détecter même de très faibles fuites.
- Au cas improbable où l'usager arriverait à déverrouiller le pistolet pendant le remplissage, l'automate détecte le problème et stoppe le remplissage, sachant par ailleurs que le pistolet est lui-même auto-obturant, ce qui double la sécurité. Ces mesures de supervision du remplissage permettent de réduire fortement les conséquences d'une éventuelle rupture du flexible de remplissage.

Enfin, un arrêt d'urgence « coup de poing » sur la borne de distribution permet à l'usager de stopper la distribution à tout instant.

Point de vue des fabricants de station



Adrien Zanoto
Responsable maîtrise des risques flottes captives / Air Liquide.

> Adrien Zanoto

« Du fait de son expérience, Air Liquide intègre les scénarios de dangers dès la conception de l'installation. Ils doivent en effet impérativement être pris en compte dans le design et dans le choix des équipements. Il s'agit de prévenir l'apparition de toute situation accidentogène. Contrairement aux opérations effectuées dans les centres de remplissage par des opérateurs formés et qualifiés, la borne de recharge d'hydrogène est entre les mains du grand public. L'ergonomie de la station doit donc guider l'utilisateur pour lui permettre à tout instant de savoir naturellement quoi faire, à chaque étape du processus de remplissage. La station doit pouvoir immédiatement et automatiquement arrêter le remplissage et déclencher une alarme adaptée. De même, il faut que ces défaillances soient tracées et analysées pour améliorer les systèmes. »

Jean-Michel Joly
Directeur d'exploitation et directeur technique, AJC.

> Jean-Michel Joly

« Le remplissage pour le chauffeur du véhicule doit être banal et les sécurités doivent être en place. Ainsi la norme américaine SAE J2601 préconise des tests d'étanchéité avant de commencer le remplissage. Il faut faire simple : connecter et appuyer sur le bouton. Des pictogrammes clairs doivent l'indiquer. »



Cadres de 9 bouteilles

RISQUE DE RUPTURE DU FLEXIBLE DE REMPLISSAGE

Pour l'usager de la station, l'opération de remplissage présente un risque en cas de rupture du flexible haute pression qui relie la borne de distribution au pistolet. Les causes possibles sont l'arrachement du flexible (en cas de dysfonctionnement du dispositif antiarrachement) ou une dégradation mécanique (usure prématurée, torsion, acte de malveillance).

Sous la pression, le flexible peut être projeté avec force, ce qu'on appelle le « coup de fouet ». La rupture du flexible peut, par ailleurs, conduire à la formation d'un jet d'hydrogène à haute pression. Ces événements peuvent blesser les personnes à proximité.

3.3 - Mettre en place une station de distribution d'hydrogène

La mise en place d'une station se déroule en plusieurs étapes :
- définition d'un cahier des charges ;
- prise en compte des prescriptions réglementaires, normatives, et analyse des risques ;
- spécification des éléments techniques ;
- emplacement de la station.

3.3.1 - Définir le cahier des charges de la station-service

Une fois choisi le mode d'approvisionnement de l'hydrogène (transport et livraison ou production sur site), le cahier des charges fonctionnel doit préciser :
- le nombre de véhicules à approvisionner ;
- la rapidité et la cadence des remplissages ;
- la situation géographique par rapport aux trajets des véhicules ;
- la métrologie, les modalités de facturation ;
- les fournitures et services de la station (électricité, eau, télécommunications, sanitaires, etc.), les services aux utilisateurs.

Ce cahier des charges, mis en regard des prescriptions réglementaires, permettra de définir les éléments techniques de la station et son emplacement.

3.3.2 - Prendre en compte les prescriptions réglementaires et normatives

La réglementation des produits utilisant l'hydrogène, obligatoire, peut varier suivant les pays. Dans le domaine des stations, il n'y a pas, à l'heure actuelle, de réglementation européenne ; la directive sur le déploiement d'infrastructures pour carburants alternatifs (directive du 28 octobre 2014) fait référence à des normes internationales (ISO) décrites ci-après. Il existe aussi des normes de référence américaines (SAE) et françaises (NF).

Normes, directives et bonnes pratiques sont de nature à garantir une bonne exécution, car elles permettent de travailler dans les règles de l'art.

3.3.2.1 - Normes et protocoles

Il existe aujourd'hui plus de 25 normes de l'ISO (organisation internationale de normalisation) et 59 normes ou recommandations de différentes organisations du secteur électrique (IEC), gazier (EIGA, CGA) et d'autres domaines mécaniques et automobiles (ASME, CSA, NFPA, SAE) concernant les stations. Elles sont répertoriées dans le document "Handbook for Approval of Hydrogen Refuelling Stations" du projet européen HyApproval (téléchargeable, cf. § 6.4).

Les constructeurs de stations-service rencontrés pour la préparation de ce guide s'appuient principalement sur la norme ISO/TS 20100:2008 (Gaseous hydrogen - Fuelling stations), qui traite des stations de distribution d'hydrogène et sur la norme SAE J2601 "Fuelling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles" sur le protocole de remplissage des véhicules.

Par ailleurs la norme ISO 17268 est relative aux dispositifs de raccordement pour le ravitaillement des véhicules à moteur en hydrogène gazeux. Enfin, la norme ISO 14687-2 spécifie la pureté de l'hydrogène distribué par les points de ravitaillement en hydrogène.

Les grands constructeurs de stations-service ont leurs propres référentiels qui sont souvent plus drastiques que les normes précitées.

En France, la norme NF M58-003 « Installation des systèmes mettant en œuvre l'hydrogène » a été publiée en décembre 2013 pour fixer les exigences des installations en matière d'équipements de production, de distribution, de récipients de stockage, de tuyauterie et, d'une manière générale, de tous les équipements fonctionnant à l'hydrogène ainsi que leurs accessoires. Cette norme vise toutes les applications stationnaires faisant appel à l'hydrogène gazeux à l'exception de certaines applications industrielles non concernées par la problématique abordée dans ce guide.

3.3.2.2 - Directives européennes

Les directives appliquées par la plupart des fabricants européens de stations-service traitent :
- des accidents industriels (Seveso - 2012/18/UE) ;
- des émissions industrielles (IED - 2010/75/EU) ;
- des atmosphères explosives (ATEX 95 - 94/9/EC, ATEX 137 - 99/92/EC) ;
- des machines (MD - 2006/42/EC) ;
- des équipements sous pression (PED - 97/23/EC, TPED - 1999/36/EC) ;
- des basses tensions (LVD - 2006/95/EC) ;
- de la compatibilité électromagnétique (EMC - 2004/108/EC).

Le marquage CE atteste au final de la conformité de la station aux exigences de sécurité européennes.

3.3.2.3 - Spécificités de la réglementation française

Dès lors qu'il y a production d'hydrogène ou stockage d'une quantité d'hydrogène supérieure à 100 kg, les stations de distribution sont soumises aux règles des installations classées pour l'environnement (ICPE, cf. § 6.1) :

- La rubrique 3420 « fabrication de produits chimiques inorganiques » couvre le cas de la production d'hydrogène sur site : cette réglementation s'applique dès la première molécule produite et impose une demande d'autorisation auprès de la préfecture du lieu d'implantation.
- La rubrique 4715 « hydrogène (numéro CAS 133-74-0) » couvre le cas du stockage et de l'emploi d'hydrogène : en dessous de 100 kg, aucune démarche n'est exigée ; entre 100 kg et 1 tonne, il faut établir un dossier de déclaration simple auprès de la DREAL ; au-delà d'une tonne, une demande d'autorisation est requise qui donnera lieu à un arrêté préfectoral. Notons que, même pour de petites ou moyennes stations de distribution délivrant quelques dizaines de kg/jour d'hydrogène, il convient de considérer la quantité maximale d'hydrogène susceptible d'être présente sur l'ensemble de l'installation (stockages sources, stockages tampons haute pression…).

Pour mémoire, la réglementation de zonage ATEX relève, en France, du code du travail ; elle concerne donc directement l'exploitant de la station.

Outre la réglementation des installations classées pour l'environnement, il faut tenir compte de la réglementation locale ou de celle de l'entité accueillant la station de distribution d'hydrogène :

- Réglementation locale : selon la nature de l'infrastructure en projet, du site visé (public ou privé) et des contraintes du plan local d'urbanisme (PLU), il peut être nécessaire de déposer une demande de permis de construire. Cette procédure est susceptible de rallonger le temps nécessaire à la construction de l'infrastructure.
- Réglementations internes de l'entité concernée : dans certains cas, il faudra obtenir l'accord des directions concernées (sécurité, environnement, immobilier) et du comité d'hygiène, de sécurité et des conditions de travail (CHSCT). Ces structures peuvent avoir des réglementations spécifiques qui s'ajoutent aux réglementations nationales et locales.

Dans tous les cas, une fois le cahier des charges défini, il est souhaitable de prendre contact avec les services de la DREAL afin de présenter le projet avant de demander une instruction formelle.

L'INERIS a édité un rapport d'étude « Benchmark stations-service hydrogène » en septembre 2014 (téléchargeable, cf. § 6.4). Ce document très complet de 175 pages brosse le contexte réglementaire et normatif international, en Europe et en Amérique-du-Nord. Il décrit dans le détail les applications de ces normes concernant tous les éléments des stations-service hydrogène. Il présente également les processus d'autorisation d'exploitation en France, en Allemagne, au Danemark, en Italie, aux États-Unis et au Canada.


Cathy Day
Chargée de mission risques accidentels / DREAL Rhône-Alpes, en charge de la thématique Energies nouvelles

Comment s'applique la réglementation en France ?

« Les stations de distribution d'hydrogène déployées aujourd'hui ne sont soumises au régime de la déclaration des ICPE que si leur stockage d'hydrogène est supérieur à 100 kg. Néanmoins, nous sommes vigilants parce qu'il s'agit d'innovation et que nous n'avons pas de retour d'expérience sur ce type d'installation. Nous demandons aux exploitants une analyse de risques spécifique pour vérifier que l'installation n'engendre pas de risques supplémentaires sur le site (effet domino). C'est elle qui définit les moyens à mettre en place pour assurer la sécurité.

Aujourd'hui, au niveau national, il n'y a aucune réglementation spécifique pour les stations de distribution d'hydrogène (cf. § 6.1). L'objectif est de la mettre en place afin de permettre par la suite une instruction plus rapide des dossiers déposés par les exploitants. Il s'agit d'être très vigilant et d'éviter les accidents qui pénaliseraient la filière. Le ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie souhaite une réglementation générique applicable à tous les dossiers. Si les stations-service respectent la future réglementation et qu'il n'apparaît pas de risque supplémentaire, alors rien ne devrait s'opposer à leur déploiement. »

Des distances de sécurité à respecter

« Pour les stations-service hydrogène extérieures dédiées aux flottes captives, la norme NF M58-003 et la réglementation ICPE (rubriques 4715 et 3420) s'appliquent. Il n'y a pas encore de texte réglementaire spécifique à ces installations en France. Cependant, l'arrêté ministériel du 12 février 1998 impose un éloignement de huit mètres de tout bâtiment ou autre potentiel de dangers voisin. Les premières analyses de risques demandées aux exploitants (stations pour chariots élévateurs) ont permis de définir un périmètre de sécurité libre de tout potentiel de danger d'un rayon minimum de six mètres autour de la borne de remplissage. Ces règles sont susceptibles d'évoluer si une réglementation spécifique est définie. »

3.3.2.4 - Analyse de risques

En théorie, une installation dont le stockage est inférieur à une tonne doit être déclarée à la préfecture. En pratique, la DREAL peut demander des compléments concernant les risques particuliers de l'installation, sous la forme d'une analyse préliminaire des risques et de calculs des effets des phénomènes dangereux. Ceux-ci sont identifiés selon les valeurs de référence concernant les installations classées (définies à l'Annexe II de l'arrêté ministériel du 29 septembre 2005). Ces compléments peuvent être réalisés avec l'aide de bureaux d'étude ou organismes de conseil spécialisés comme par exemple l'INERIS, le Bureau Veritas ou l'APAVE.

Des études de sécurité supplémentaires peuvent également être décidées et menées par les opérateurs des équipements en fonction de leurs propres contraintes ou règlements internes.

3.3.3 - Spécifier et installer une station-service

Suite à l'élaboration du cahier des charges et conformément au cadre réglementaire, les éléments techniques suivants seront définis :

- la capacité de compression ;
- la capacité de stockage tampon haute pression ;
- la conception du système (qualité de l'intégration des composants, fiabilité, ergonomie des équipements et interface utilisateur) ;
- les accès des véhicules clients (aire de positionnement, surfaces d'attente, places de parking) et des livraisons (manœuvres d'un camion, d'un chariot élévateur) ;
- l'installation électrique.

L'emplacement de la station-service dépend des possibilités d'implantation et des conclusions de l'analyse de risques. Le schéma d'implantation comprend un plan de masse, les travaux de génie civil, les servitudes, les équipements de surveillance et de sécurité.

Notons que la réglementation actuelle permet de réduire les distances de sécurité par l'emploi de murs ou d'autres barrières de protection.

L'infrastructure de la station-service peut comporter une dalle en béton destinée à supporter les différents équipements (stockages, modules de surpression, bornes de remplissage des véhicules…) et la charge mécanique de l'ensemble. Il n'y a pas de norme définissant le type de dalle répondant aux contraintes mécaniques. Toutefois, la référence normative ISO/TS 20100:2008 prescrit l'emploi de matériaux non combustibles permettant la mise à la terre de l'aire de ravitaillement des véhicules. En pratique, une dalle en béton ferraillé avec une terre en fond de fouilles répond à cette prescription.

Par ailleurs, les composants de la station (cadres d'hydrogène source, canalisations, véhicule lors du ravitaillement) doivent être connectés à la terre commune de manière à rendre équipotentiels tous les équipements métalliques du site.

L'infrastructure peut comporter des murs pouvant réduire les distances d'éloignement, des murs ou des enceintes grillagées de protection des composants de la station, ainsi qu'une clôture d'enceinte et des accès.

La station-service peut être placée sous vidéosurveillance et protégée des intrusions. Elle doit être équipée d'extincteurs et de signalétiques de danger. Le risque de choc par les véhicules doit être prévenu par des bornes anticollision.

3.4 - Assurer la sécurité en phase d'exploitation

3.4.1 - Activités de maintenance liées à la sécurité

Les maintenances régulières, qu'elles soient réglementaires ou préconisées par le constructeur, permettent d'assurer la sécurité de l'installation. Le constructeur fournit un plan de maintenance et d'entretien ou de remplacement précisant les périodicités. Il peut porter notamment sur les équipements suivants :

- électrolyseur ou vaporeformeur si production d'hydrogène sur le site ;
- compresseur d'hydrogène ;
- compresseur et sécheur d'air si utilisé (entretien tous les 2 000, 4 000, ou 6 000 heures) ;
- flexible de remplissage haute pression (à remplacer tous les deux à cinq ans selon les préconisations du constructeur, qui doit être capable de tenir 100 000 cycles selon le Handbook for Approval of Hydrogen Refuelling Stations, téléchargeable, cf. § 6.4) ;
- pistolet de distribution ;
- dispositif de sécurité antiarrachement ;
- détecteur de gaz (explosimètre) ;
- détecteur de flamme, de fumée, ou de chaleur ;
- vannes, électrovannes, débitmètre (entretien tous les trois à six mois) ;
- filtres en ligne ;
- évents…

Dans tous les cas, ces vérifications répondent à un certain nombre de principes généraux :

- Après chaque maintenance, il faut effectuer un test d'étanchéité sous gaz neutre (azote) de la totalité de l'installation, à la pression de service maximum, comme avant le premier démarrage.

- Au moins tous les six mois, ou selon les préconisations du fabricant de la station, il faut effectuer un test d'étanchéité sous hydrogène de la totalité de l'installation, à la pression de service maximum. On peut aussi rechercher d'éventuelles fuites à l'aide d'un détecteur de gaz spécifique (renifleur ou produit moussant).
- Pour les équipements sous pression, une requalification décennale pour les récipients est obligatoire. Cette opération doit être effectuée sous le contrôle d'un organisme habilité.
- La station doit comptabiliser le nombre de remplissages complets et partiels des réservoirs haute pression pour permettre d'effectuer les vérifications ou remplacements qui s'imposent en fonction du type de réservoir utilisé (cf. § 4.1.3.4).
- Les vérifications des équipements électriques soumis à la directive ATEX doivent être effectuées tous les ans conformément à la norme IEC (ou EN) 60079-17 (Atmosphères explosives - Partie 17 : inspection et entretien des installations électriques).
- Les équipements de sécurité doivent être vérifiés tous les six mois conformément à la norme IEC (ou EN) 60079-29-2 (Atmosphères explosives - Partie 29-2 : détecteurs de gaz - Sélection, installation, utilisation et maintenance des détecteurs de gaz inflammables et d'oxygène).
- La vérification de la continuité des lignes de mise à la terre des équipements métalliques et de la pince de mise à la terre est indispensable afin, d'une part, de permettre l'écoulement des charges électrostatiques (supprimer les sources d'énergie d'inflammation) et, d'autre part, d'assurer l'équipotentialité. La réglementation du code du travail prévoit le contrôle des installations électriques (dispositif différentiel à courant résiduel, mise à la terre des carcasses...), à la mise en œuvre puis périodiquement.

Une station de distribution ouverte au public peut dans certain cas être considérée comme un établissement recevant du public (ERP) ; elle est alors soumise, dans le cadre du code du travail, au contrôle de ses moyens généraux de secours et de sécurité.

3.4.2 - Personnel de maintenance

L'exploitation et la maintenance d'une station-service doivent être effectuées par du personnel qualifié et formé. Le personnel intervenant doit porter une tenue adaptée, des équipements de protection individuelle et un explosimètre calibré et étalonné sur l'hydrogène dès lors qu'il est amené à entrer dans une zone ATEX. Toute maintenance ou tous travaux de réparation portant sur les équipements de la station doivent être planifiés et faire l'objet d'une mise en sécurité préalable.

Il est nécessaire d'établir un plan de prévention, mais aussi un permis de feu si les travaux sont susceptibles de générer des étincelles, une flamme nue ou un point chaud dans une zone proche sauf si l'installation est inertée.

Pour 70 % des accidents impliquant l'hydrogène et dont les causes sont connues, la base de données française ARIA[10] qui recense les accidents technologiques, met en évidence des défaillances organisationnelles et humaines, notamment lors des interventions pour maintenance et entretien.

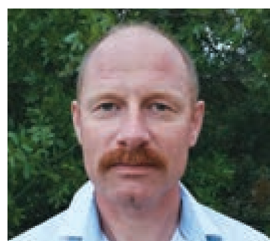
3.4.3 - Interactions avec les utilisateurs

Une partie des équipements des stations est utilisée directement par les clients moyennant des informations et des consignes de sécurité concises. L'interface utilisateur et l'installation sont aussi conçues pour éviter tout incident sans que l'opérateur inexpérimenté n'ait à agir. Certains équipements utilisés, comme le pistolet de remplissage ou son flexible, bien qu'issus de la longue expérience de l'industrie du gaz, peuvent néanmoins être des éléments vulnérables (choc, écrasement, pincement...) et donc des sources de danger potentiel. Des vérifications visuelles quotidiennes permettent de s'assurer de l'absence de dommage sur ces matériels.

Avec l'hydrogène, il n'y a pas de risque de pollution des sols ou d'exposition des personnes aux composés organiques volatils (COV) liés aux rejets accidentels, comme pour les stations de distribution de carburant liquide.

3.4.4 - Interactions avec les services de secours

En début de projet, il est recommandé d'associer les services de secours (SDIS et centres de secours) qui pourront émettre des recommandations.



Lieutenant-colonel François Laumann
SDIS 04 / Directeur scientifique et technique du projet européen HyResponse.

« Un plan d'intervention peut être élaboré en collaboration avec les SDIS, notamment pour définir et normaliser les périmètres de sécurité à mettre en œuvre en cas d'accident (fuite, incendie…). Les moyens d'action (isolation, purge…) et de coupure d'urgence (gaz, électricité) doivent être identifiés. »

(10) La base ARIA (Analyse, recherche et information sur les accidents) est gérée par le Bureau d'analyse des risques et pollutions industriels (BARPI) au sein du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (cf. § 6.4).

3.5 - Produire l'hydrogène sur site par électrolyse

L'électrolyseur peut s'avérer un choix intéressant comme source d'hydrogène de la station. Cela permet de s'affranchir des problèmes de transport et d'approvisionnement en gaz, et son installation peut être facilement couplée avec des sources d'électricité renouvelables.

3.5.1 - Technologies

Une cellule d'électrolyse se compose de deux électrodes (anode et cathode, conducteurs électriques) reliées à un générateur de courant continu et séparées par un électrolyte (milieu conducteur ionique). La nature de l'électrolyte est la principale différence entre les trois types d'électrolyseurs existants :

- L'électrolyseur alcalin, dont l'électrolyte est constitué d'une solution aqueuse basique (potasse). Les électrodes sont alors séparées par un diaphragme garantissant la séparation des gaz produits.
- L'électrolyseur PEM (Polymer Electrolyte Membrane), à membrane échangeuse de protons, dont l'électrolyte est solide, constitué d'une membrane polymère conductrice de protons.
- L'électrolyseur SOFC (Solid Oxide Fuel Cells) à oxydes solide, dit à haute température, constitué d'une membrane céramique conductrice d'ions O_2. Cette technologie est peu déployée aujourd'hui.

Aujourd'hui, la technologie alcaline est la plus mature en termes d'industrialisation. Elle est compétitive par rapport aux techniques traditionnelles de production d'hydrogène (cf. § 1.1.1). La technologie PEM se révèle, pour l'instant, plus onéreuse pour un électrolyseur de même capacité, mais elle présente un fort potentiel de développement, notamment grâce à l'absence d'électrolytes liquides, à une forte capacité à fonctionner en régime dynamique et à une sensibilité moindre aux variations de puissance électrique d'entrée. De plus, les électrolyseurs PEM bénéficient des progrès des piles à combustible du même nom et des baisses de coûts associées.

Dans l'industrie, les électrolyseurs se présentent en modules de petite ou moyenne capacité (0,5 à 800 Nm^3/h[11] d'hydrogène soit 0,05 à 72 kg/h). Ces modules comprennent généralement : une alimentation électrique, les cellules d'électrolyse, une unité de purification de l'eau, une unité de déshumidification des gaz, une unité de purification de l'hydrogène, un compresseur, un système de contrôle-commande et un système de régulation thermique.

Certaines technologies d'électrolyseurs fournissent directement de l'hydrogène sous une pression allant jusqu'à 3 MPa.

3.5.2 - Gestion de l'hydrogène dans l'unité de production par électrolyse

Comme pour les piles à hydrogène, le système de production d'hydrogène par électrolyse présente plusieurs boucles : une boucle d'entrée en eau pure[12], une boucle de puissance permettant l'apport d'énergie électrique à l'électrolyseur, une boucle de régulation thermique, une boucle d'oxygène et une boucle d'hydrogène.

Le guide d'information ADEME sur les risques et mesures de sécurité propres aux installations de production d'hydrogène détaille les différentes technologies d'électrolyseurs et les risques associés à leur déploiement.

3.5.3 - Installation, mise en œuvre et maintenance

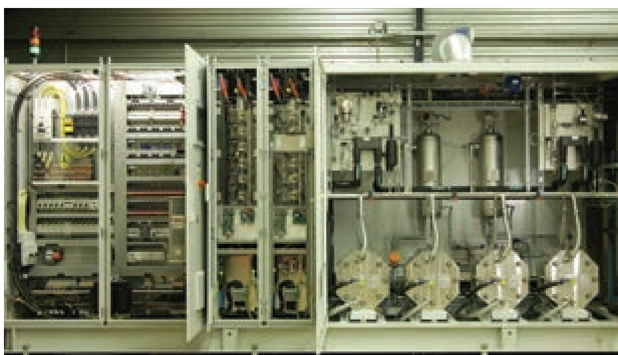
L'électrolyseur est conçu et exploité selon les grands principes de sécurité liés à l'utilisation de l'hydrogène, incluant le risque spécifique lié à la présence simultanée d'oxygène et d'hydrogène. Sur le plan réglementaire, la rubrique ICPE 3420 couvre le cas de toutes les méthodes de production industrielles d'hydrogène.

Le déploiement d'une telle solution dans une station implique néanmoins quelques dispositions spécifiques : une empreinte au sol adéquate, une alimentation électrique de puissance bien dimensionnée, une alimentation en eau et une évacuation pour les effluents liquides. Ainsi un électrolyseur de la gamme 240 Nm^3/h nécessitera une puissance électrique de l'ordre de 1,2 MW, générera une consommation d'eau de 20 m^3 par jour pour une production d'hydrogène allant jusqu'à 500 kg par jour.

L'électrolyseur est généralement installé en extérieur dans un conteneur standard de type maritime avec tous les éléments systèmes. Les réservoirs de gaz ou le stockage solide (hydrures métalliques) de l'hydrogène sont séparés de l'unité de production.

Les distances de sécurité recommandées par les normes ou issues d'une étude de risques spécifique conditionnent la topologie et l'environnement de l'installation : une empreinte au sol importante pour positionner les différents éléments, une ventilation suffisante, naturelle ou, le cas échéant, forcée.

(11) Le normo-m^3 est un m^3 aux conditions normales de température et pression.
(12) Dans le cas de la technologie PEM, la pureté de l'eau est cruciale. Une conductivité inférieure à un microsiemens par centimètre (µS/cm) est généralement requise.



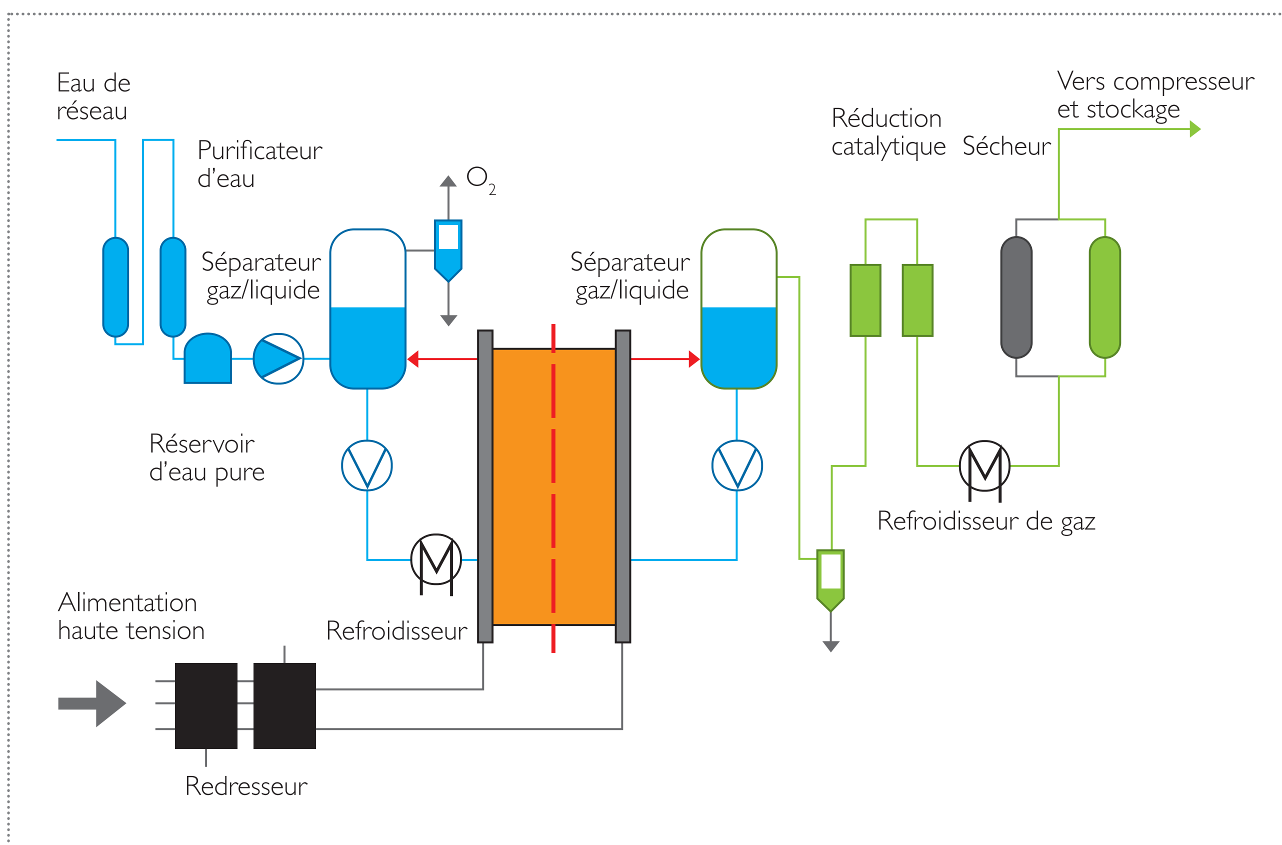
Électrolyseur PEM d'Areva H2Gen

L'électrolyseur est soumis aux mêmes directives que les autres éléments de la station.

Les opérations de maintenance sont effectuées selon leur niveau et les cas traités :

- par l'opérateur de la station-service pour la maintenance de niveau 1, c'est-à-dire non liées à la sécurité, après formation par le fabricant de la machine.
- par le fabricant ou un partenaire technique identifié, formé et suivi par le fabricant à partir du niveau 2 (éventuellement par l'opérateur de la station selon son niveau de compétence).

SCHÉMA DE FONCTIONNEMENT D'UN ÉLECTROLYSEUR PEM (AREVA H2GEN)



Selon les principaux fabricants, la fréquence standard d'un arrêt des équipements pour effectuer les opérations de maintenance est de deux à trois jours, tous les six mois.

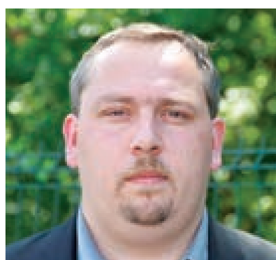
La maintenance du fabricant garantit que les risques mécaniques dus aux températures et aux pressions de fonctionnement sont contrôlés.

Pour les premières applications de flottes captives, les stations équipées d'un électrolyseur seront installées, a priori, sur des sites privés, aux accès contrôlés et dont le personnel sera formé à la surveillance du bon fonctionnement et de l'état de la station. Comme pour les stations avec stockage sans production locale, les chauffeurs qui viendront remplir le réservoir de leur véhicule fonctionnant à l'hydrogène recevront une formation et devront respecter des consignes de sécurité. A l'avenir, en France, comme c'est déjà le cas en Allemagne, on verra probablement des stations-service multicarburants, dont l'hydrogène.

3.6 - Déploiement

Les risques liés à l'hydrogène étant connus et maîtrisés de longue date dans le domaine des gaz industriels, un déploiement d'équipements destinés au grand public est aujourd'hui envisageable. La situation réglementaire, bien que différente d'un pays à un autre, s'appuie sur des normes et protocoles internationaux éprouvés (ISO, SAE, directives européennes).

En France, la réglementation des stations-service fait partie des grands chantiers réglementaires à venir : station avec production et stockage ou avec stockage seul, station hydrogène seul ou multicarburants, espace ouvert ou fermé, proximité de bâtiments, accueil du public, présence d'activités industrielles… Ces critères seront déterminants dans la topologie d'implantation et dans les moyens à mettre en place pour gérer les risques et assurer la sécurité.



Fabien Auprêtre
Directeur recherche et développement / Areva H2Gen.

Principes de conception et d'exploitation pour un électrolyseur PEM

« Nous avons fait le choix à la conception de nos produits de n'avoir que des composants ATEX, même si l'électrolyseur en tant que tel n'est pas soumis à cette directive. Nous portons une attention particulière à la sécurité des personnels en phase de fonctionnement et de maintenance, notamment en leur demandant de respecter un périmètre de sécurité de 1,5 à 2 mètres autour de l'électrolyseur lorsque celui-ci est en fonctionnement.

Dans tous les cas, les opérateurs forment leur personnel à l'exploitation des équipements. Pour les stations qui accueilleront du public, l'installation d'un électrolyseur pourra avoir un impact sur l'emprise au sol : celui-ci devrait être positionné à l'écart de la borne de distribution où les utilisateurs viennent faire le plein de leur véhicule. Les stations de distribution font partie des marchés potentiels pour le futur. On en est au démarrage, mais il y a une accélération, en particulier en Allemagne. »



Lionel Prévors
Direction générale de la prévention des risques (DGPR).

Accompagnement du développement par les services de l'État

« La DGPR accompagne le développement des solutions basées sur l'hydrogène-énergie. Le sujet est prioritaire. En l'absence de réglementation spécifiquement dédiée à l'hydrogène-énergie et à ses nouvelles applications, les DREAL, au cas par cas en coordination avec la DGPR, instruisent les premiers projets de stations de distribution d'hydrogène gazeux dans des entrepôts.

La DGPR, avec les acteurs industriels des filières concernées et sur la base des nouveaux projets, élaborera, au fur et à mesure des nouvelles problématiques industrielles, une réglementation proportionnée, adaptée aux enjeux. »

4 - Le véhicule à hydrogène

Les véhicules à hydrogène sont homologués à l'instar des véhicules dotés d'un autre mode de propulsion. Il n'y a pas de restriction d'usage en matière d'accès à la chaussée publique. Un tel véhicule possède une carte grise obtenue en préfecture, qui mentionne simplement que son carburant est l'hydrogène. De même, ces véhicules sont assurés auprès des compagnies au même titre et dans les mêmes conditions que des véhicules thermiques, hybrides, électriques à batteries. Ils ne sont pas considérés par les assureurs comme des véhicules à risque spécifique.

4.1 - Conception sécuritaire et homologation

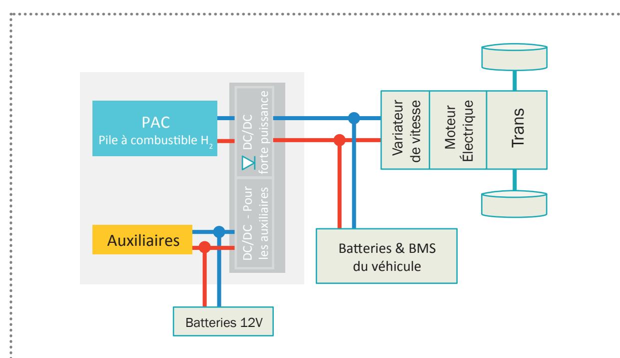
4.1.1 - Schéma énergétique type

Dans un véhicule équipé d'une pile à combustible (PAC), les principaux éléments concernés par la sécurité liée à l'hydrogène sont réunis dans le module énergétique, qui comprend notamment le système pile lui-même (système PAC), le réservoir de stockage, et éventuellement un convertisseur de courant continu (DC/DC) entre la pile et les batteries.

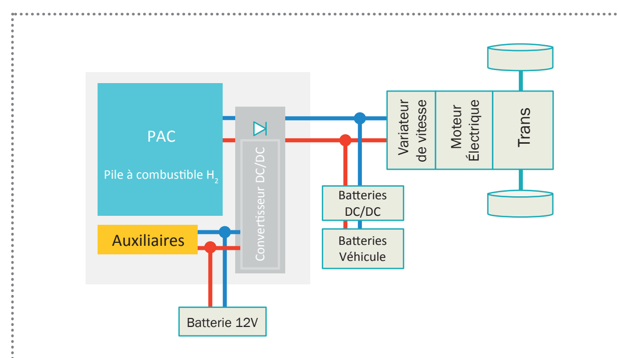
Le système pile est constitué de la pile à combustible et de ses auxiliaires : une alimentation en hydrogène, une alimentation en air couplée à d'éventuels circuits d'humidification, un circuit de refroidissement, un ou des convertisseurs électriques, le tout géré par un système de contrôle électronique et logiciel. La technologie PEMFC est celle utilisée généralement dans les applications de mobilité du fait de sa robustesse et de son fonctionnement à température modérée (60 à 110 °C).

Un ou des réservoirs de stockage d'hydrogène permettent d'embarquer la quantité d'hydrogène selon l'autonomie recherchée.

VÉHICULE ÉLECTRIQUE À PROLONGATEUR D'AUTONOMIE GRÂCE À UNE PILE À COMBUSTIBLE



VÉHICULE ÉLECTRIQUE À PILE À COMBUSTIBLE PLEINE PUISSANCE





Crédit photo : Pierre Jayet

KANGOO H_2



Toyota Mirai

4.1.2 - Garantir un fonctionnement sécuritaire

Les systèmes à pile à combustible s'intègrent dans les processus de développement et d'industrialisation des véhicules électriques. Ils répondent aux mêmes exigences de sécurité. Pour cela, dès la conception, un certain nombre d'objectifs de sécurité sont intégrés. Ils peuvent être ainsi suivis, vérifiés et validés lors des phases de développement puis de production. Le concepteur d'un système à pile à combustible est en mesure de fournir l'ensemble des scénarios de défaillance de son système ayant un impact sécuritaire, accompagné du plan d'action et de validation pour limiter leur apparition.

Trois grands principes permettent de maîtriser le risque de création d'une atmosphère explosive en hydrogène au sein d'un véhicule :

- éviter les fuites grâce à une conception sûre et un entretien adéquat ;
- ventiler correctement tous les espaces clos dans lesquels une fuite pourrait entraîner une accumulation d'hydrogène ;
- détecter la fuite dès son apparition et déclencher une fermeture rapide du système d'alimentation en hydrogène.

4.1.2.1 - Éviter les fuites

Afin d'éviter les fuites sur le circuit hydrogène, le nombre de connexions entre les différents éléments est minimisé (on remplace, par exemple, des raccords vissés par des raccords soudés). Les matériaux et la géométrie des équipements sont choisis, dimensionnés et testés pour résister aux conditions réelles d'usages auxquelles les équipements sont soumis. « Les constructeurs s'assurent que les composants hydrogène et systèmes hydrogène fonctionnent de manière correcte et sûre et qu'ils résistent de façon fiable aux conditions de fonctionnement électriques, mécaniques, thermiques et chimiques, sans fuites ni déformations visibles », extrait du règlement (CE) n°79/2009 du Parlement et du Conseil européens du 14 janvier 2009, article 5 (cf. § 4.1.4.2).

4.1.2.2 - Ventiler les volumes confinés

L'air ambiant du système PAC est ventilé afin d'empêcher l'accumulation d'hydrogène en cas de fuite. L'objectif d'une bonne ventilation est de ne pas piéger le gaz dans une « poche » dont la concentration pourrait être supérieure à la limite d'inflammation. Les concepteurs intègrent des évents, motorisés ou naturels, qui renouvellent, de manière permanente, l'air ambiant du système et l'évacuent à l'extérieur du véhicule (cf. § 4.4.2). L'hydrogène étant une molécule légère et de petite taille, son évacuation en est facilitée.

4.1.2.3 - Détecter la présence d'hydrogène

Des capteurs d'hydrogène, disposés dans l'environnement du système PAC, permettent de détecter les fuites. L'analyse des risques réalisée lors de la conception peut conduire à l'installation de plusieurs capteurs, qui peuvent être volontairement redondant.

Une fuite dans le système peut également être détectée par le contrôleur de la pile à combustible via la mesure d'une consommation anormale d'hydrogène.

Un seuil de concentration d'hydrogène est fixé, correspondant à une fraction de la limite inférieure d'explosivité (LIE) de l'hydrogène dans l'air. Lorsque ce seuil est atteint, l'alimentation électrique de la vanne d'ouverture du réservoir est instantanément coupée. Le flux d'hydrogène est interrompu et la faible quantité résiduelle est rapidement évacuée. Le choix de la fraction de LIE dépend de la cinétique de la chaîne et des hypothèses de fuite : importance de la fuite, positionnement des capteurs, volumes en jeu, vitesse de coupure, degré de ventilation… La fourchette standard est de 10 % à 25 % et peut aller jusqu'à 50 %. En général, deux seuils sont appliqués : un premier d'alarme, un deuxième de mise en sécurité.



Jean-Luc Mussot
PDG d'Ad-Venta.

Principes de conception pour des composants sous haute pression

« Pour que leur fiabilité soit garantie, nos têtes de réservoirs et détendeurs passent par des séries de tests draconiens : essais hydrauliques à une pression au moins égale à 1,5 fois la pression de service, essais de cyclage, essais spécifiques aux applications visées. Pour être homologués, les produits doivent passer une batterie de tests longs, contraignants et difficiles à atteindre auprès d'un organisme certifié.

Nous concevons des produits sans maintenance : nous privilégions le remplacement. Tout est calculé en fonction du nombre de cycles de remplissage complets à tenir : 5 000 cycles avant remplacement pour un véhicule, sur la base d'une durée de vie en service de vingt ans.

Pour le futur, l'objectif est de simplifier la ligne hydrogène, ce qui permettra d'augmenter la sécurité, de réduire les coûts, de faciliter le montage. »

4.1.3 - Circuit hydrogène et dispositifs de sécurité

4.1.3.1 - Eléments haute pression

Les réservoirs homologués sont conçus pour résister à des pressions de 2,25 à 3 fois la pression de service (par exemple 210 MPa pour une pression de service de 70 MPa). De fait, les réservoirs enrobés de carbone (de type III et IV, cf. § 4.1.3.4) sont plus solides que l'ensemble des autres éléments du véhicule.

En pratique, la plupart des réservoirs sont équipés avec :

- Un thermofusible (TPRD, Thermally activated Pressure Relief Device) conçu pour protéger le réservoir en cas d'agression thermique. L'élévation de la température déclenche l'ouverture d'un orifice de décharge d'hydrogène. Ce dispositif obligatoire (règlement CE n° 79/2009, cf. § 4.1.4.2) permet une purge contrôlée de l'ensemble de l'hydrogène vers un évent extérieur via un circuit dédié. Le réservoir est ainsi vidé rapidement (de l'ordre d'une centaine de secondes) et l'explosion évitée. Le dégagement est sonore et peut donner lieu à une flamme de type torchère.
- Un limiteur de débit (Excess Flow Valve) peut circonscrire les conséquences de la fuite en cas de rupture du circuit aval.
- Une vanne d'isolement du réservoir qui ne peut s'ouvrir que sur une demande du système. Toute défaillance du système a pour conséquence de la fermer et donc d'isoler le réservoir. Elle n'est pas obligatoire, mais on la trouve, à ce jour, sur tous les véhicules.

Bien que cela ne se soit encore jamais produit, on ne peut pas exclure un dysfonctionnement exceptionnel du TPRD, notamment une fuite du dispositif (l'ensemble de l'hydrogène présent dans le réservoir est alors simplement libéré par le circuit d'évent). Les nouvelles conception de TPRD (avec tiroir) ont pris en compte les retours d'expérience et améliorent considérablement la fiabilité.

4.1.3.2 - Détente de l'hydrogène et alimentation de la pile à combustible

L'hydrogène sous pression est détendu pour alimenter la pile à combustible. Cette détente peut être réalisée en deux étapes, la première à la sortie du réservoir (à moins de 2 MPa) et la seconde à l'entrée de la pile à combustible (jusqu'à quelques centaines de mbar soit 0,01 MPa). Entre ces deux détendeurs, une vanne ouvre ou ferme le circuit. Avant l'entrée dans la pile à combustible, la pression de l'hydrogène est mesurée par un capteur de pression afin de vérifier que l'hydrogène soit dans les bonnes conditions de pression.

Lorsque le véhicule n'est pas en fonctionnement, le réservoir est isolé par la vanne. Lorsqu'il est en fonctionnement, l'hydrogène n'est délivré au circuit de la pile à combustible que lorsque les vannes d'ouverture du réservoir et d'entrée à la pile sont activées.

4.1.3.3 - Consommation et évacuation de l'hydrogène non consommé

Pour le bon fonctionnement de la pile et selon sa technologie, une petite partie de l'hydrogène non consommé est remis en circulation ou évacuée sous forme de purges automatiques et intermittentes, plus nombreuses pendant les phases de démarrage et d'arrêt de la pile qu'en fonctionnement continu. Évacuer ces petites quantités d'hydrogène dans l'atmosphère ne présente aucun risque pour l'utilisateur tant que le taux d'hydrogène reste inférieur à 4 % dans le gaz éjecté.

4.1.3.4 - Réservoirs d'hydrogène haute pression

Les réservoirs utilisés pour les applications embarquées peuvent être destinés à contenir :

- de l'hydrogène sous forme gazeux comprimé à haute pression (35 ou 70 MPa) ;
- de l'hydrogène liquide refroidi à très basse température (-253 °C), une technologie qui n'est plus utilisée dans les applications embarquées, hormis dans le domaine spatial ;
- de l'hydrogène adsorbé sur des composés solides (nanotubes de carbone par exemple) ou inséré dans une phase solide telle que des hydrures métalliques.

Les réservoirs sont répertoriés par type, de I à IV :

- Type I : constitué d'un seul matériau (aluminium ou acier) assurant la résistance mécanique et l'étanchéité ;
- Type II : généralement en acier fretté, avec une virole renforcée, réalisée en fibre de verre ou de carbone ;
- Type III : l'étanchéité est assurée par un matériau métallique, appelé « liner » ; la résistance mécanique de l'ensemble est assurée par ce matériau ainsi que par une enveloppe en fibres de carbone ;
- Type IV : l'étanchéité est assurée par un liner en plastique ; la résistance mécanique par un bobinage en fibres de carbone.

Les réservoirs de type I et II sont utilisés pour le stockage usuel de l'hydrogène dans des bouteilles ou des cadres de bouteilles pour des pressions modérées allant jusqu'à 30 MPa ; ils sont généralement trop lourds et encombrants pour les véhicules équipés de piles à hydrogène.



Olivier Perrier
Directeur général de Raigi

« La sécurité est intrinsèque au réservoir ; elle est prise en compte dès sa conception. Les normes définissent la perméation en fonction du type d'application. Cela permet de déterminer l'épaisseur du liner à installer. La norme est fixée afin qu'il n'y ait aucun risque en cas de confinement. »


Crédit photo : Ullit

Réservoir 35 MPa



Tête de bouteille

Ils conviennent néanmoins dans certains cas, comme pour les chariots élévateurs. Les réservoirs de type III et IV sont actuellement privilégiés pour tout autre véhicule, léger ou lourd, car ils permettent d'embarquer une quantité d'hydrogène plus importante.

Les réservoirs sont généralement de forme cylindrique et peuvent être groupés par grappe. Un réservoir complet est équipé d'un dispositif de connexion et de sécurité appelé tête de bouteille, dont le rôle est d'assurer la sécurité et de permettre la connexion d'un détendeur et de capteurs de pression et de température. Les industriels réfléchissent à des solutions pour intégrer ce dispositif à l'intérieur de la bouteille.

Le processus de qualification et d'homologation des réservoirs est adapté à l'exigence de sécurité requis pour des véhicules destinés au grand public. Ainsi les fabricants garantissent, dans les conditions normales d'utilisation, un nombre de cycles de remplissage (2 000 cycles par exemple ou 5 000 selon le règlement CE 79/2009) ou une durée au-delà de laquelle le réservoir doit être contrôlé par le constructeur (quinze ans par exemple).

Parmi les essais réglementaires, des tirs à balles réelles sont effectués lors de la certification des réservoirs afin de s'assurer qu'un impact de balle n'entraîne pas l'éclatement du réservoir.



Fabien Nony
Responsable thématique du stockage gazeux comprimé au CEA, Le Ripault.

« La sécurité est en premier lieu assurée par la coque composite du réservoir, conçue et validée pour sa résistance aux sollicitations en service et aux événements accidentels. De nombreux essais réglementaires sont effectués comme la résistance au feu, aux impacts, aux produits chimiques et aux entailles. La coque du réservoir est conçue et validée afin d'éviter l'éclatement pour privilégier le percement ou la fuite. »

En cas d'incendie dans le véhicule, le risque thermique sur le réservoir est géré par des dispositifs spécifiques, généralement placés sur la ou les extrémités du réservoir, lui assurant une décompression rapide et maîtrisée. Le projet HyResponse (cf. § 6.6) montre, par exemple, le comportement de réservoirs d'hydrogène à 35 et 70 MPa lors d'incendies de véhicules, et la méthode employée pour en assurer l'extinction.

L'intégration du réservoir dans le véhicule doit permettre de préserver son intégrité en cas d'accident, d'assurer une bonne gestion des vibrations et de limiter les effets d'impacts et projections divers (gravillons…) ou encore les conséquences de la projection d'eau salée.

4.1.4 - Homologation

La sécurité des véhicules à hydrogène est garantie par leur homologation, avant la mise en circulation, comme pour tous les autres types de véhicules destinés à circuler sur la voie publique. L'autorité publique garantit ainsi que le niveau de sécurité est celui attendu par la société.

LE PROCESSUS D'HOMOLOGATION D'UN VÉHICULE À PILE À COMBUSTIBLE

Pour la mise en circulation d'un véhicule, la demande de Réception à titre isolé (RTI) est faite au CNRV (Centre national de réception des véhicules) qui impose les essais à réaliser. Ceux-ci sont assurés par l'Utac qui délivre des procès-verbaux en fonction de la validation des attentes. Le CNRV délivre un document permettant de circuler dans l'Union européenne avec une immatriculation française. Pour une série de véhicules à commercialiser au sein de l'Union européenne, le CNRV délivre une Réception communautaire européenne (RCE). Cette dernière procédure d'homologation prend de deux à trois mois.

4.1.4.1 - Système électrique

Le véhicule à hydrogène est un véhicule électrique, qui fabrique son électricité à bord grâce à une pile à hydrogène. Le moteur est électrique et le véhicule embarque généralement des batteries. La tension électrique inhérente au fonctionnement d'un moteur électrique est une source de danger d'électrisation, d'électrocution ou d'incendie. Les garanties sécuritaires sur le plan électrique sont strictement les mêmes que pour les autres véhicules à propulsion électrique à batteries.

Dans la plupart des architectures de véhicules à pile à combustible actuellement disponibles, une ou plusieurs batteries font office de tampon entre le moteur électrique et la PAC. Les plus fortes tensions électriques (plusieurs centaines de volts) se situent au niveau des batteries de traction, des convertisseurs de tension et du ou des moteurs électriques. Les tensions générées par la pile à combustible sont souvent plus faibles, mais présentent également un risque.

À noter que, suivant les cas et les configurations, le bloc batterie électrique de puissance est de plus ou moins grande capacité (les véhicules à hydrogène "Full Power", entièrement pile à combustible, n'ont qu'un petit bloc de batterie tampon).

Dans ce cas, les problématiques sécuritaires liées à la chimie des batteries sont réduites (en particulier les risques d'incendie). Dans tous les cas, les batteries de puissance, quel que soit le nombre de kilowattheures embarqués, comportent des risques électriques liés au fort voltage (de 400 à 600 volts).

Le principal règlement applicable de manière spécifique aux véhicules électriques est le R100. Le réseau électrique de forte tension est protégé et identifié par des câbles de couleur orange comme sur un véhicule électrique classique.

4.1.4.2 - Système hydrogène

En sus des règles d'homologation classiques pour les véhicules thermiques et des règles liées à l'électrification du système de propulsion, les véhicules à PAC sont soumis à des règlements européens spécifiques, comme le CE 79/2009 et sa directive d'application 406/2010.

Ces deux règlements imposent notamment d'apporter la preuve de la sûreté de fonctionnement du système hydrogène. Ils imposent également une « réception par type » pour les composants les plus sensibles (ceux à l'intérieur desquels la pression de l'hydrogène gazeux est supérieure à 3 MPa), garantissant leur sécurité par des cycles de tests.


Julien Roussel
Chef de projet Fuel Cell Vehicle, Toyota.

Principe de conception : point de vue d'un constructeur automobile

« Toyota développe la technologie de la pile à combustible depuis vingt ans et a introduit récemment la Mirai, première berline de série à pile à combustible. Notre retour d'expérience depuis 2008 porte sur une centaine de véhicules qui ont parcouru les routes au Japon, en Europe et aux États-Unis. Aucun accident de personne n'a été rapporté et le retour des usagers est très positif, y compris pour le remplissage du véhicule. Pour nous, l'hydrogène pourrait être un des piliers de la mobilité électrique et du management énergétique des cent prochaines années.

Nos deux principes sont : répondre parfaitement aux réglementations et proposer toujours plus, grâce à des tests internes complémentaires, sans jamais faire de compromis sur la sécurité, notre priorité. Les règles sont les mêmes que pour tout autre véhicule (stabilité, trajectoire…) avec un volet hydrogène et système pile à combustible en plus. Les nouveaux composants intégrés ne doivent comporter aucune faiblesse.

Le design de la Mirai est conçu pour éviter tout problème dans l'habitacle, pour les usagers et les services de secours. Le réservoir est surdimensionné pour résister à des pressions très élevées (plus de 225 % la pression de service) et aux tests de résistance les plus sévères. En cas (très improbable) de fuite, il ne peut pas y avoir d'hydrogène concentré dans l'habitacle. En outre, différents détecteurs d'hydrogène sont placés aux endroits stratégiques. Différents scénarios de défaillances et d'accidents ont été identifiés permettant de s'assurer que l'hydrogène puisse être libéré depuis les réservoirs sans explosion ou dislocation, en cas d'incendie, grâce à un thermofusible (TPRD), conformément aux exigences de la réglementation GTR 13 des Nations unies. En cas d'accident de la route, toutes les vannes se ferment, quels que soient les dommages causés au système électrique lors de la collision.

En ce qui concerne le stationnement souterrain ou en garage privé de véhicules à hydrogène, nous manquons de repères réglementaires en France. Les réglementations nationales et régionales doivent être adaptées. La réglementation UN GTR13 définit des conditions strictes qui pourraient être réutilisées ou transposées en droit français (à l'instar de la norme adoptée en Allemagne concernant le parking privé et public). Si la France veut développer la filière hydrogène, elle doit revisiter, adapter et faciliter l'adoption de l'hydrogène comme carburant comme c'est le cas dans d'autres pays où nous commercialisons nos véhicules. »

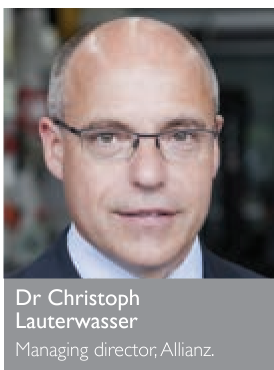
Ainsi les parties suivantes du système, lorsqu'elles sont présentes, sont soumises réglementairement à un ensemble d'épreuves de cycles de pression, d'étanchéité, d'usure, de résistance à la corrosion :

- le réservoir complet ainsi que ses fixations ;
- le détendeur en sortie du réservoir ;
- la vanne d'arrêt automatique (ou électrovanne d'ouverture du réservoir) ;
- le ou les capteurs de pression, de température d'hydrogène et d'écoulement de la partie haute pression ;
- les flexibles d'hydrogène ;
- l'ensemble de la ligne de remplissage comprenant : le raccord ou réceptacle de ravitaillement, le raccord du système de stockage amovible, le clapet antiretour, ainsi que le filtre à hydrogène et l'échangeur thermique ;
- la ou les soupapes de décompression (désignées aussi par soupape de sécurité hydrogène, thermofusible ou TPRD) et l'ensemble du dispositif de décompression ;
- le ou les capteurs, sondes de détection (ou détecteurs de fuite d'hydrogène).

4.2 - Utilisation et maintenance des véhicules

4.2.1 - Assurance du véhicule

Toutes les compagnies d'assurance assurent les véhicules à pile à combustible comme n'importe quel autre véhicule homologué, au même tarif que les véhicules électriques à batteries.



Dr Christoph Lauterwasser
Managing director, Allianz.

Le véhicule hydrogène, un véhicule comme un autre

« Le Centre technique automobile Allianz effectue des crash tests à 10 et 15 km/h, vitesses auxquelles surviennent 80 % des accidents, sur tous les nouveaux véhicules de tourisme disponibles en Allemagne. Le Centre technique s'est engagé très tôt dans les tests de véhicules à hydrogène qui sont à la fois des véhicules à batterie et des véhicules à gaz. Il n'y a pas de raison de penser, à ce jour, qu'un nombre important de véhicules à pile à combustible circulant sur les routes ait un impact négatif sur la sécurité routière. Les fabricants sont en première ligne. Ils doivent veiller à ce que ces véhicules ne provoquent pas plus de dommages que d'autres. »

4.2.2 - Remplissage du réservoir

La borne de recharge est l'interface physique entre le véhicule et la station. La personne effectuant le ravitaillement suit le protocole établi destiné à assurer le remplissage du véhicule en toute sécurité : branchement éventuel du véhicule à la terre, connexion et verrouillage de la vanne de distribution sur l'embout du réservoir puis lancement de la séquence automatique. Pendant le remplissage, le système pile est arrêté et l'hydrogène n'est pas admis dans le circuit basse pression.

L'hydrogène est admis dans le réservoir du véhicule par une conduite spécifique équipée d'un clapet antiretour. Par conséquent, l'hydrogène ne peut circuler que de la station vers le réservoir. L'arrêt du remplissage peut être automatiquement effectué lorsque celui-ci est plein grâce à un pressostat (capteur de pression) ou à une communication entre le véhicule et la station. Lorsque le réservoir est plein, un signal indique à l'opérateur qu'il peut déverrouiller la vanne et enlever la prise de terre. C'est l'automate de la borne qui gère la vitesse de remplissage du réservoir du véhicule selon les protocoles définis dans la norme SAE J2601. Ces protocoles de remplissage permettent de contrôler les phénomènes physiques liés au transfert rapide de gaz sous pression et, tout particulièrement, pour éviter une montée en température trop importante du réservoir. La norme SAE J2601 empêche grâce à un « détrompeur physique » le remplissage par une station à 70 MPa d'un réservoir de pression inférieure, mais le contraire est possible (remplissage d'un véhicule 70 MPa par une station de pression inférieure).

Les réservoirs sont conçus pour supporter cette opération de remplissage sans dégradation du matériau et de ses performances, à de nombreuses reprises, c'est-à-dire tout au long de leur durée de vie (chaque réservoir est garanti sur 5 500 opérations de remplissage).

A la fin du remplissage, l'hydrogène restant dans le flexible du pistolet de remplissage est évacué vers un évent de la station de remplissage.

Sur certains véhicules (Renault Kangoo H_2, ix35 Hyundai par exemple), le véhicule ne peut pas démarrer si la trappe n'est pas correctement refermée.

4.2.3 - Expérience utilisateur d'un véhicule à hydrogène

Le véhicule se conduit exactement comme un véhicule électrique à batteries : boîte automatique, accélérations puissantes au démarrage du fait d'un couple maximal comparé à un véhicule thermique.

Le silence d'un moteur électrique conduit l'utilisateur à percevoir davantage certains bruits spécifiques au système pile à combustible, notamment les sifflements possibles de compresseurs d'air et les bruits de purge du circuit d'hydrogène. En effet, en plus de l'échappement de l'air non consommé par la pile, des rejets résiduels d'hydrogène peuvent survenir de manière régulière et programmée au cours du fonctionnement normal du véhicule. Ceux-ci génèrent un bruit d'échappement un peu plus important au moment de ces purges d'hydrogène ; ce comportement est tout à fait normal.

Dans le cas d'un véhicule Full Power, si une défaillance complète du système hydrogène se produit, une réserve d'énergie tampon sur une batterie de faible capacité permet d'accéder à un mode de performances dégradées pour conserver la maîtrise du véhicule, suffisamment longtemps pour le mettre en sécurité.

Dans le cas d'un véhicule équipé d'un prolongateur d'autonomie, monté en parallèle du système batterie existant, une défaillance sur le système PAC ne perturbe pas le fonctionnement du véhicule, qui continue grâce à l'énergie restante de sa batterie électrique déterminant l'autonomie résiduelle du véhicule.

Comme pour un véhicule électrique à batteries, une tension élevée est toujours présente à la sortie du pack batterie, même après l'arrêt du véhicule. L'utilisateur n'a pas accès aux éléments sous tension.

4.2.4 - Signalétique des véhicules à hydrogène

4.2.4.1 - Signalétique extérieure

L'identification et le marquage de tous les véhicules fonctionnant à l'hydrogène est obligatoire quel que soit leur catégorie selon l'annexe V du règlement CE 79/2009 (cf. § 4.1.4.2). Seule change la taille et la localisation de la signalétique.

- Dans le cas des véhicules automobiles (catégorie M1) ainsi que des petits camions (catégorie N1), une étiquette est apposée dans le compartiment du moteur du véhicule et une autre à proximité de l'embout de remplissage (visible de l'extérieur ou à l'ouverture de la trappe).
- Dans le cas des véhicules de transport en commun type bus (catégories M2 et M3), des étiquettes sont apposées à l'avant et à l'arrière du véhicule, à proximité de l'embout de remplissage et à côté de chaque accès.
- Dans le cas des véhicules destinés au transport de marchandises (catégories N2 et N3), des étiquettes doivent être apposées à l'avant et à l'arrière du véhicule et à proximité de la trappe de remplissage.



SIGNALÉTIQUE APPOSÉE SUR LES VÉHICULES UTILISANT DE L'HYDROGÈNE (RÈGLEMENT CE 79/2009).



Patrice Domenge
Directeur projets et support clients, Symbio FCell.

Collaboration entre équipementiers et sapeurs-pompiers

« Les deux grands types de sécurité dans le monde de l'automobile sont la sécurité active et la sécurité passive. Ils s'appliquent également aux véhicules à hydrogène. L'intégration de la sécurité au niveau du véhicule se fait à toutes les étapes de conception et de réalisation, en répondant aux normes et réglementations, et à l'aide d'outils de sureté de fonctionnement, de simulation et d'essais. Les éléments de sécurité sont la conception mécanique du système, la protection du kit hydrogène (protection électrique, mécanique-sécurité aux chocs, fluidique), le confinement des espaces où peuvent avoir lieu les fuites d'hydrogène et, en cas de fuite, une aération maximale. Des détecteurs d'hydrogène provo-quent une alerte visuelle et sonore et l'arrêt du kit ou du véhicule.

Symbio FCell travaille avec les services de secours, SDIS 86 et SDIS 44, qui sont les références françaises pour les véhicules électriques et au gaz. Nous avons collaboré à l'écriture de la note d'information opérationnelle « Risque hydrogène » pour les pompiers (cf. encadré § 2.1) en cas d'intervention sur des véhicules à hydrogène. En pratique, les pompiers utilisent les mêmes méthodes que pour l'utilisation du gaz naturel pour véhicules (GNV). Le Kangoo ZE H_2 que nous avons conçu avec Renault Tech et commercialisé fin 2014, répond bien aux méthodes d'intervention des pompiers. Des améliorations sont apportées telles que l'ajout d'étiquettes de signalisation et d'un flash-code sur le véhicule, afin qu'il puisse être identifié sur les six faces, et un étiquetage pour signaler la valeur de la pression de stockage.

A ce jour, il n'y a pas de réglementation nationale pour les parkings et les tunnels, seuls les arrêtés préfectoraux permettent d'interdire le stockage d'un véhicule à hydrogène sur site public. Pour l'introduction des véhicules à hydrogène, il est important qu'il n'y ait pas d'impact sur les habitudes des utilisateurs. Le changement d'énergie doit être transparent ou apporter plus d'agrément au conducteur. Le retour d'expérience de l'utilisation de Kangoo ZE H_2 par les facteurs de La Poste est très positif (projet MOBILHyTEst à Dole et Luxeuil-les-Bains, cf. § Contexte). »

4.2.4.2 - Signalétique intérieure

Pour toutes les catégories de véhicules, chacun des composants hydrogène fonctionnant à une pression de service supérieure à 3 MPa indique clairement la présence de ce gaz ainsi que son sens de circulation. Le réservoir de stockage doit ainsi être clairement marqué (partie 2 de l'annexe IV du règlement CE 79/2009, cf. § 4.1.4.2).

De plus, la nature du combustible utilisé et la pression de service doivent être obligatoirement indiqués au niveau de la trappe de remplissage (« H_2 gazeux 35 MPa » par exemple).

4.2.5 - Maintenance

4.2.5.1 - Maintenance préventive

Le maintien du niveau de sécurité d'un véhicule dépend de la qualité de son entretien. Le carnet d'entretien détaille les maintenances à effectuer sur le véhicule tout au long de sa durée d'utilisation, ainsi que leur périodicité.

Comme pour tout autre type de véhicule, le concepteur définit précisément le plan de maintenance préventive. Le conducteur est averti par l'ordinateur de bord ou l'outil de diagnostic dès lors que cette maintenance arrive à échéance.

Comme pour tout véhicule électrique, l'ensemble des réseaux électriques du véhicule est contrôlé de manière précise. Le fonctionnement de la PAC et des autres parties spécifiques à l'hydrogène est également suivi selon le même principe.

Par ailleurs, le règlement CE 79/2009 et sa directive d'application 406/2010 (cf. § 4.1.4.2) imposent un suivi et un renouvellement préventif des composants de l'ensemble du système hydrogène. Ce renouvellement doit se faire après un nombre de remplissages ou un temps déterminé par le fabricant du composant ou par la réglementation. Après vérification, il n'y a pas nécessairement remplacement de ces composants si ceux-ci ont passé les validations imposées.

4.2.5.2 - Maintenance curative

Dès lors que la pile à combustible est arrêtée, il n'y a plus de circulation d'hydrogène dans le système, car le réservoir reste fermé. Mais quoi qu'il en soit, toute intervention sur l'ensemble du système pouvant contenir le gaz sous pression ne peut être effectuée que par un technicien disposant obligatoirement d'une habilitation électrique et formé à ce système.

4.3 - Fuites d'hydrogène et espaces confinés

4.3.1 - Débit de fuite d'hydrogène prévisible

La mise en œuvre de flottes captives de véhicules à hydrogène doit intégrer une réflexion sur les infrastructures de recharge et de stationnement des véhicules. En particulier, si ces deux opérations sont réalisées en milieu confiné, il est nécessaire d'évaluer et de maîtriser les risques liés à l'accumulation d'hydrogène en cas de fuite.

Une fuite d'hydrogène peut, en effet, générer une atmosphère explosive (ATEX), en particulier dans un espace confiné comme un garage, un tunnel ou une station de distribution. Il est donc important d'évaluer la fuite d'hydrogène possible et de déterminer le débit de ventilation à mettre en œuvre pour éviter l'accumulation d'hydrogène.

Pour un véhicule, et plus généralement pour un dispositif mettant en œuvre de l'hydrogène, le débit de fuite au niveau du circuit de gaz peut être classé en trois catégories :

- Faibles fuites par perméation : inhérentes au système, elles varient en fonction du matériau dans lequel diffuse l'hydrogène. Ces débits de fuite sont généralement faibles et ne sont pas susceptibles de générer une ATEX en milieu confiné. Elles sont connues des constructeurs et de l'ordre de 10-7 à 10-6 m^3/h. Par grand froid, lors du démarrage, du fait de propriétés différentes de dilatation, il peut également y avoir quelques fuites sans aucune conséquence sur la sécurité, compte-tenu des très faibles quantités d'hydrogène en jeu. En général, le système pile est contenu dans une enveloppe étanche d'où les molécules d'hydrogène seront évacuées par l'évent, par ventilation forcée ou naturelle selon les conceptions des systèmes.
- Fuites moyennes résultant de l'usure du véhicule, due au montage et démontage régulier des organes (lors du remplissage par exemple), à la fatigue des matériaux, etc. Ces fuites de nature chronique sont, selon le retour d'expériences du projet DRIVE[13], de l'ordre de 10-4 à 10-3 m^3/h.
- Fuites résultant d'une situation accidentelle. Elles sont plus massives, mais ont une probabilité d'occurrence relativement faible. Une analyse de risques est nécessaire pour déterminer leur gravité et leur probabilité. Ces débits de fuite sont typiquement supérieurs à 10-1 m^3/h.

(13) DRIVE (Données expérimentales pour l'évaluation des risques hydrogène, la validation d'outils numériques et l'édition de référentiels) est un projet de recherche et d'innovation financé par l'Agence nationale de la recherche en 2005.

Pour déterminer les fuites prévisibles dans des espaces confinés et prévenir la formation des ATEX, il est nécessaire de mettre en place une ventilation adaptée. Une analyse de risques est nécessaire pour déterminer le type de fuite prévisible, le débit de ventilation à appliquer ainsi que son type (naturelle, forcée ou mécanique) et son mode (continue ou intermittent, éventuellement asservi à une détection). Le type de fuite prévisible dépend des éléments susceptibles d'être présents dans l'espace confiné (véhicules, station de distribution).

4.3.2 - Circulation en espaces confinés

Les espaces confinés requièrent parfois une ventilation appropriée. Le premier objectif de la ventilation est d'empêcher l'accumulation d'une ATEX en espace confiné ; puis de réduire son volume par dilution des gaz inflammables ; enfin de limiter son temps de séjour.

Le calcul du débit minimal de ventilation requis (Qventilation, en m^3/h) dépend de la fuite prévisible (Qfuite en m^3/h) issue de l'analyse de risques :

$$Q_{ventilation} = \frac{100}{LIE} \times Q_{fuite} \times K$$

Plusieurs méthodes existent pour déterminer les zones potentielles d'atmosphère explosive.

Par exemple, pour la ventilation d'une salle de charge, le débit de ventilation minimum peut être calculé pour que la concentration en gaz à l'intérieur de l'espace confiné reste inférieure à une fraction 1/K de la concentration limite dangereuse. Dans le cas de l'hydrogène, on s'attache à prévenir le risque d'explosion. La concentration limite dangereuse est donc la limite inférieure d'explosivité (LIE). Le débit de ventilation se calcule selon la relation suivante : dans un espace confiné où des personnes sont susceptibles d'être présentes, on fera alors en sorte de ne pas dépasser 10 % de la LIE (K=10). Pour ce calcul, la concentration en hydrogène dans l'espace confiné est considérée comme homogène.

Cependant, il appartient à l'exploitant de définir son zonage. Des méthodes plus proches de la réalité du comportement physique de l'hydrogène peuvent alors être utilisées : méthodes analytiques ou simulations. Elles sont en général préférées, comme dans le cas de déploiements ayant déjà été réalisés pour des stations de recharge en hydrogène de chariots élévateurs par exemple.

Si la ventilation représente un organe de sécurité, il est néanmoins particulièrement important de s'assurer régulièrement de son bon fonctionnement. Un système de ventilation de secours doit pouvoir prendre le relais en cas d'un dysfonctionnement du système de ventilation principal.

Si cela n'est pas possible, des dispositifs doivent être mis en place pour détecter un dysfonctionnement alertant un service de maintenance qui doit en assurer la réparation dans les plus brefs délais. Pour économiser l'énergie(14), la mise en place d'un système de détection d'hydrogène est également possible. Ce système déclenche la ventilation en position « régime forcé ». Un système de détection hydrogène, comme tous les instruments de mesure, dérive dans le temps et son fonctionnement peut être altéré par des paramètres extérieurs. Il est donc indispensable de vérifier périodiquement son bon fonctionnement en lien avec la ventilation et le cas échéant, de réaliser les opérations de maintenance adéquates.

4.4 - Situations d'accidents

4.4.1 - Les bons réflexes et l'intervention du personnel de secours

En cas d'accident, le conducteur du véhicule devra se comporter de la même façon que pour tout autre type de véhicule : commencer par couper le contact et se mettre hors de danger pour appeler les secours.

D'éventuelles recommandations additionnelles ou spécifiques sont décrites dans le manuel d'utilisateur fourni par le constructeur à destination des primo-intervenants. Le processus d'intervention de chaque véhicule est décrit par l'intermédiaire de fiches FAD (Fiche d'aide à la désincarcération) et ERG (Emergency Response Guide). Ces dernières ont pour but d'aider les services de secours à déterminer les éléments précis et généraux, sources de danger d'un véhicule, et à se protéger et protéger le public au cours de la phase d'intervention initiale consécutive à un accident.

Le personnel de secours est formé et adapte son processus d'intervention suivant le type de véhicule sur lequel il doit intervenir. Dans le cas de l'hydrogène et afin d'anticiper l'arrivée de ces véhicules, le projet européen HyResponse (cf. § 6.6) a pour objectif de développer des formations à destination des primo-intervenants pour mieux connaître les risques hydrogène et la façon de les traiter en situation d'accident.

(14) Les systèmes de détection hydrogène doivent être conformes aux exigences de la norme ISO 26142 « Détecteurs d'hydrogène - Applications fixes ».

4.4.2 - Recommandations vis-à-vis de la protection incendie en cas d'agression thermique

Le principal risque lié au réservoir est l'agression thermique. Il est donc essentiel que la maîtrise du risque incendie au sein d'un espace confiné soit renforcée. Dans le véhicule, l'élément clé pour la sécurité contre les agressions thermiques est le thermofusible (TPRD).

Activé, il relâche l'intégralité de l'hydrogène sous pression (parfois sous forme de jet d'hydrogène enflammé) afin d'éviter la rupture mécanique du réservoir supprimant les effets de projection et de flux thermiques associés. L'orifice du thermofusible doit être dimensionné en fonction de la pression de service et de la quantité d'hydrogène dans le réservoir. L'action protectrice du thermofusible peut être renforcée par la présence d'un écran thermique protégeant le réservoir.

Le jet enflammé pouvant résulter de l'activation du fusible thermique doit être pris en compte dans l'analyse de risques de l'infrastructure, afin de s'assurer qu'il ne cause pas d'effets graves mettant en péril la sécurité des personnes. De même, en cas de présence d'une station de distribution dans cette enceinte, les scénarios de jet enflammé associés au dispositif de distribution d'hydrogène doivent être pris en compte pour établir les distances de sécurité avec, par exemple, les autres véhicules en stationnement.

4.5 - Durée de vie et fin de vie des véhicules

La durée de vie d'un véhicule à pile à combustible est similaire à celle d'un véhicule thermique ou électrique classique. Les systèmes de piles à combustible pour l'automobile sont conçus pour une durée de fonctionnement de l'ordre de 5 000 heures, l'équivalent d'environ 300 000 km à 60 km/h de moyenne (cycles réels pour les usages automobile). La PAC pourrait ensuite être remplacée ou reconditionnée.

Le constructeur du système pile à combustible a l'obligation d'indiquer la manière de recycler les composants de son dispositif (notamment réservoir et pile), comme le font tous les constructeurs automobiles.

CIRCULATION DES VÉHICULES DANS LES TUNNELS

« Le déploiement de nouvelles technologies de véhicules, dont les piles à combustible, nécessite de bien appréhender leurs éventuelles spécificités en milieu confiné, pour permettre leur circulation dans les tunnels routiers. De ce point de vue, un véhicule à hydrogène présente-t-il un risque additionnel comparé aux véhicules utilisant des carburants classiques (essence, diesel) ?

L'hydrogène présente des risques d'inflammation et d'explosion plus élevés que les carburants classiques (plage d'inflammabilité et d'explosivité plus étendue, énergie d'inflammation plus faible). Particulièrement préoccupants en tunnel, ils devront être mieux cernés, qu'ils concernent l'hydrogène à l'intérieur du réservoir ou l'hydrogène libéré par déclenchement des thermofusibles. L'état de l'art reste, notamment, à conforter en matière d'effets domino (véhicule à hydrogène situé à proximité immédiate d'un incendie à développement rapide ou atteint par des fumées chaudes susceptibles de déclencher les thermofusibles). Ces risques pourraient varier significativement selon le type de véhicule impliqué (véhicule léger, bus, poids lourd) et en fonction de la proportion de véhicules fonctionnant à l'hydrogène, notamment si celle-ci devenait importante.

Les réflexions du Centre d'étude sur les tunnels (CETU) concernent la sécurité des usagers. Toutefois, les améliorations des systèmes embarqués qui pourraient en découler profiteront à la technologie elle-même. Dans l'attente de ces améliorations, ou en tout état de cause, des conclusions des études de sécurité, il n'est pas exclu que des restrictions de circulation soient décidées en ce qui concerne les tunnels routiers. A titre d'exemple, il existe actuellement en France une recommandation visant à interdire la circulation des bus fonctionnant au gaz naturel pour véhicule (GNV) dans les tunnels interdits aux marchandises dangereuses. Il n'y a en revanche quasiment plus aucune restriction de circulation pour les véhicules fonctionnant au GPL depuis qu'ils ont l'obligation de disposer d'une soupape de sécurité sur les réservoirs.

De façon générale, le recours à des équipements de sécurité des tunnels pour réduire les risques spécifiques liés à l'hydrogène (systèmes de ventilation, par exemple) devra être compatible avec les stratégies adaptées à l'ensemble des véhicules. »

Christophe Willmann, chargé d'études au pôle sécurité du Centre d'études sur les tunnels (CETU).

Note d'information du CETU sur le transport des marchandises dangereuses téléchargeable, cf. § 6.4.

5 - Conclusion

L'utilisation d'énergie, sous toutes ses formes, gazeuse, électrique ou liquide, présente des risques, notamment lorsqu'elle est concentrée et confinée. Dans le domaine des transports, chaque type de véhicule présente des risques spécifiques, qu'il s'agisse des véhicules thermiques classiques embarquant un réservoir de plusieurs dizaines de litres de combustible, des véhicules électriques à batterie, des véhicules à combustion au gaz ou bien encore des véhicules électriques à hydrogène. L'enjeu, en termes de sécurité, consiste à ce que ces risques soient anticipés, et ce, à différents niveaux : lors de la conception des véhicules et des équipements, lors du dimensionnement des infrastructures de recharge en hydrogène de la station-service ou de remplissage du réservoir, lors de l'utilisation des véhicules par les usagers selon l'environnement, lors des interventions dans le cadre d'incidents, lors des phases de maintenance par les exploitants, etc.

Ce guide précise les risques qui relèvent spécifiquement des technologies hydrogène. Il apporte des informations, des principes et des recommandations sur leur maîtrise pour un usage en mobilité. Ces éléments s'appuient sur un corpus de textes normatifs et réglementaires internationaux, eux-mêmes bâtis sur des connaissances et savoir-faire industriels maîtrisés. Ainsi, le règlement européen CE 79/2009 donne un cadre à l'homologation des véhicules à hydrogène, en fixant en particulier des exigences sécuritaires de conception des véhicules. Le projet de norme ISO/TC 20100 fait, quant à lui, référence, au niveau européen, concernant les stations-service et les équipements de recharge en hydrogène. Il devrait s'imposer en appui de la directive 2014/94 UE du Parlement et du Conseil européens, adoptée le 22 octobre 2014, qui prévoit le déploiement en Europe d'une infrastructure pour carburants alternatifs dont l'hydrogène.

Outre les normes et réglementations, la diffusion des savoir-faire et des bonnes pratiques est essentielle pour anticiper les risques. A ce titre, le développement de formations à tous niveaux est à encourager : formation des utilisateurs des véhicules, des responsables gestionnaires de flottes, des agents en charge de l'exploitation et de la maintenance d'une station-service, etc. Dans ce domaine, on peut souligner que les sapeurs-pompiers ont d'ores et déjà défini les éléments de doctrines d'intervention en vue d'éventuels accidents ; ils ont également mis en place des formations pratiques, en lien avec les services départementaux d'incendie et de secours. Leur appréhension des risques liés à l'hydrogène les conduit à considérer les véhicules à hydrogène ni plus ni moins dangereux qu'un autre type de véhicules, mais avec des risques spécifiques qu'il convient de connaître et de maîtriser.

6 - Annexes

6.1 - Réglementation

L'hydrogène est actuellement considéré dans la réglementation des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) comme une substance de base de l'industrie chimique, produite et manipulée en milieu industriel par des acteurs formés aux risques associés. La réglementation est donc essentiellement adaptée à la production, à la manipulation et au stockage de grandes quantités de substances chimiques. La directive 2012/18/UE, dite SEVESO 3, et la directive 2010/75/UE relative aux émissions industrielles, dite IED, s'appliquent à l'hydrogène dès lors que certains seuils de quantités présentes sur les sites sont atteints ou qu'il y a une activité de production d'hydrogène.

La transposition de la directive SEVESO 3 dans la réglementation nationale a conduit à modifier la nomenclature des installations classées pour la simplifier et prendre en compte les conséquences de la classification des substances et mélanges induites par le règlement CLP[15]. Ainsi, depuis le 1er juin 2015, les rubriques « 1000 », de la partie « Substances » de la nomenclature actuelle sont supprimées et organisées dans de nouvelles rubriques dites « 4000 », calées sur les mentions de dangers de la directive SEVESO.

L'hydrogène qui, jusqu'au 31 mai 2015, était visé par la rubrique ICPE 1416 (stockage ou emploi de l'hydrogène) est désormais couvert par la seule rubrique ICPE 4715 « hydrogène (numéro CAS 133-74-0) ». Les deux régimes de classement (l'autorisation et la déclaration, procédure plus légère) tiennent compte de la quantité d'hydrogène susceptible d'être présente dans l'installation, à savoir :

- Régime de l'autorisation (4715.1) : la quantité d'hydrogène susceptible d'être présente dans l'installation étant supérieure ou égale à une tonne.
- Régime de la déclaration (4715.2) : la quantité d'hydrogène susceptible d'être présente dans l'installation étant supérieure à 100 kg mais inférieure à une tonne.

En deçà de 100 kg sur le site, l'entreprise n'est pas soumise à la législation des ICPE et n'a pas de démarche à effectuer en relation avec le code de l'environnement.

Les installations de production d'hydrogène relevant de la directive relative aux émissions industrielles sont identifiées dans la nomenclature des installations classées ; elles sont rattachées à une rubrique numérotée dans la série des « 3000 ». La directive IED définit, au niveau européen, une approche intégrée de la prévention et de la réduction des pollutions émises par les installations industrielles et agricoles. La production d'hydrogène est ainsi visée par la rubrique ICPE 3420, « fabrication en quantité industrielle par transformation chimique ou biologique de produits chimiques inorganiques » (voir tableau ci-dessous). A ce titre, la production d'hydrogène est donc soumise dès la première molécule au régime de l'autorisation.

3420 . FABRICATION DE PRODUITS CHIMIQUES INORGANIQUES
RUBRIQUE CRÉÉE PAR LE DÉCRET N° 2013-375 DU 2 MAI 2013

Fabrication en quantité industrielle par transformation chimique ou biologique de produits chimiques inorganiques, tels que :	
A) Gaz, tels que ammoniac, chlore ou chlorure d'hydrogène, fluor ou fluorure d'hydrogène, oxydes de carbone, composés sulfuriques, oxydes d'azote, hydrogène, dioxyde de soufre, chlorure de carbonyle…	(A-3)
B) Acides, tels que acide chromique, acide fluorhydrique, acide phosphorique, acide nitrique, acide chlorhydrique, acide sulfurique, oléum, acides sulfurés…	(A-3)
C) Bases, telles que hydroxyde d'ammonium, hydroxyde de potassium, hydroxyde de sodium…	(A-3)
D) Sels, tels que chlorure d'ammonium, chlorate de potassium, carbonate de potassium, carbonate de sodium, perborate, nitrate d'argent…	(A-3)
e) Non-métaux, oxydes métalliques ou autres composés inorganiques, tels que carbure de calcium…	(A-3)

D'après http://www.ineris.fr/aida/consultation_document/25136
A : régime d'autorisation / 3 : rayon d'affichage minimum autour de l'installation à respecter pour l'enquête publique, en kilomètres

(15) CLP : Règlement sur la classification, l'étiquetage et l'emballage des substances et des mélanges.

La constitution d'un dossier d'autorisation au titre d'une ICPE, définie dans le code de l'environnement, comprend notamment une étude des impacts de l'installation sur son environnement et une étude de dangers.

L'étude d'impacts permet d'estimer les effets directs et indirects, temporaires et permanents de l'installation sur l'environnement (rejets dans l'air, dans l'eau, déchets produits, niveaux de bruit, protection contre la foudre…) et de proposer les mesures limitant, atténuant ou compensant les impacts négatifs.

L'étude de dangers identifie et décrit les dangers que peut présenter l'installation en cas d'accident et présente leurs conséquences en termes de gravité, classées selon leurs effets (thermique, mécanique, toxique...). Elle s'appuie sur l'accidentologie existante et sur une méthode globale itérative de type étude préliminaire des risques qui permet d'identifier tous les scénarios susceptibles d'être, directement ou par effet domino, à l'origine d'un accident majeur. L'étude de dangers justifie les mesures techniques et organisationnelles propres à réduire la probabilité d'occurrence des incidents et leurs conséquences.

Une fois déposé auprès des services de la préfecture le dossier de demande d'autorisation, instruit par les DREAL, fait l'objet d'une instruction qui peut durer jusqu'à une année.

Dans le cas d'une installation soumise à déclaration, l'exploitant doit constituer un dossier comprenant principalement des renseignements à caractères administratifs, à remettre en préfecture. L'exploitation des installations soumises à déclaration est encadrée par des arrêtés ministériels de prescriptions générales qui sont rédigés pour chaque type d'activité industrielle. Au cours de l''instruction de ces dossiers, qui prend généralement de un à trois mois, l'inspection des installations classées peut proposer des prescriptions pour prendre en compte les spécificités de certains projets.

L'objectif des services de l'État est d'accompagner le développement de la filière hydrogène-énergie avec une réglementation appropriée. Celle-ci évolue dans différents domaines, notamment celui de l'utilisation de l'hydrogène gazeux pour alimenter les chariots élévateurs dans les entrepôts. Un arrêté ministériel fixant des prescriptions techniques spécifiques (débit, distances de séparation, etc.) est en cours de rédaction. Il est préparé à partir de réflexions et analyses du groupe de travail hydrogène-énergie, piloté par la DGPR et intégrant les fédérations professionnelles (Afhypac, assurances, entrepôts logistiques, experts…). Il devrait être publié prochainement.

Le même groupe, mais dans une autre configuration, travaillera à l'élaboration de prescriptions techniques pour aboutir à une réglementation spécifique aux stations-service de distribution d'hydrogène. Les aspects concernant les flottes captives de véhicules à hydrogène seront également examinés. Les premières installations seront étudiées par le groupe de travail et le retour d'expérience sera utilisé pour élaborer les prescriptions et les mesures de sécurité à mettre en œuvre (distances, effets thermiques…), dans les futures stations-service de distribution d'hydrogène.

Dans un premier temps et d'ici à la publication de ces textes réglementaires, l'administration pourrait demander que les stations-service de distribution d'hydrogène gazeux, bien que soumises à déclaration, fassent l'objet d'une analyse des risques.

6.2 - Sécurité civile et formation

La sécurité civile et la formation sont au cœur d'un projet européen lancé en 2013 pour quatre ans : HyResponse (cf. § 6.6). Il est cofinancé par le Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) et par un groupement de scientifiques et d'industriels européens de la filière hydrogène. Son objectif est de créer une plateforme européenne de formation dédiée au risque hydrogène à destination des primo-intervenants comme les sapeurs-pompiers ou les pompiers privés, des industriels et des administratifs. Le projet a pour ambition de développer des formations pédagogiques (théorie, réalité virtuelle, mise en pratique) afin de permettre une meilleure perception des risques hydrogène, notamment dans le cadre du déploiement de systèmes et d'infrastructures comme les véhicules à pile à combustible et les stations de ravitaillement en hydrogène. Il est porté par sept partenaires : l'ENSOSP (coordinateur), l'université d'Ulster, Areva Energy Storage, Air Liquide, Federazione delle Associazioni Scientifiche e Tecniche (Fast), CCS Group et CRIsis Simulation Engineering (Crise). HyResponse comporte aussi un groupe consultatif ouvert aux primo-intervenants, aux opérateurs de sites, aux industriels de l'hydrogène et aux constructeurs automobiles.

Ce projet doit déboucher sur un programme de formation complet portant sur : la connaissance des risques et de la sécurité des applications utilisant de l'hydrogène ; la formation opérationnelle sur des maquettes à l'échelle réelle pour des applications de transport ou stationnaires ; la formation à l'intervention sur une plateforme de réalité virtuelle reproduisant des scénarios d'accidents. L'objectif est de former 50 primo-intervenants et de fournir un guide de

réponse en cas d'urgence. Le programme a également pour ambition de disséminer et perpétuer la formation de primo-intervenants afin de faciliter l'introduction et l'acceptation sociétale des technologies de l'hydrogène.

Projet européen soutenu par le Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU), il s'appuie sur une collaboration internationale plus large puisqu'il associe des services incendies membres de l'ACP (Allemagne, Royaume-Uni, France, Belgique, Danemark, Italie, Pologne, États-Unis) et l'association internationale des services de secours et d'incendie (CTIF) représentant 36 pays. Cette dernière organisation a créé en décembre 2013 une commission sur les nouvelles technologies et les techniques de désincarcération. HyResponse est aussi en relation avec le ministère américain de l'Énergie (DoE) pour établir des programmes communs de formation des primo-intervenants.

La méthodologie développée par HyResponse se fonde sur :

Des scénarios d'urgence et des stratégies de première intervention :

- Description des applications de pile à combustible et d'hydrogène, leur concept de sécurité et les dispositifs de sécurité.
- Développement de scénarios typiques détaillés et évaluation des conséquences associées.
- Stratégies d'intervention opérationnelle d'urgence.

Une plateforme de formation opérationnelle :

- Basée sur le site de l'ENSOSP à Aix-en-Provence.
- Plateau technique installé sur une aire goudronnée de 5 000 m^2.
- Green Box d'Areva SE, conteneur de McPhy.
- Véhicule léger et chariot élévateur à PAC-H_2.
- Station de ravitaillement en hydrogène.
- Études de feu de type torchère, d'explosion confinée, d'explosion de bouteilles.
- Extinction de feu de véhicules.

Une plateforme de réalité virtuelle

- Création de la plateforme.
- Définition des exercices de réalité virtuelle en 3D incluant toute la chaîne de commandement.
- Prise en compte de la phénoménologie de l'hydrogène pour les exercices de réalité virtuelle.
- Scénarios d'accidents avec intervention des secours.

Des sessions de formation

- Établissement d'une base de données des primo-intervenants impliqués dans des projets européens sur l'hydrogène.
- Implémentation des sessions de formation de primo-intervenants.
- Création d'un guide européen de réponse en cas d'urgence expliquant les détails de la stratégie d'intervention et les tactiques utilisées.









Platforme de réalité : exemples de scénario d'accident

6.3 - Abréviations et acronymes

- ACP : Advisory and Consultative Panel
- ASME : American Society of Mecanical Engineers
- ATEX : Atmosphère explosive
- CAPEX : CAPital EXpenditures (dépenses de capital, investissements)
- CEA : Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
- CGA : Compressed Gas Association
- CNRS : Centre national de recherche scientifique
- CNRV : Centre national de réception des véhicules
- CSA : Canadian Standards Association
- CTIF : Comité technique international de prévention et d'extinction du feu
- DGPR : Direction générale de la Prévention des risques
- DGSCGC : Direction générale de la Sécurité civile et de la Gestion des crises
- DoE : Department of Energy (US)
- DREAL : Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
- ENSOSP : École nationale supérieure des officiers sapeurs-pompiers
- EIGA : European Industrial Gases Association
- ERG : Emergency Response Guide
- FAD : Fiche d'aide à la désincarcération
- FCH-JU : Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (Initiative commune pour les piles à combustible et l'hydrogène).
- ICPE : Installations classées pour la protection de l'environnement
- IEC : International Electrotechnical Commission
- IFPEN : Institut français du pétrole et des énergies nouvelles
- NFPA : National Fire Protection Association
- OPEX : OPerational EXpenditures (dépenses d'exploitation)
- PEMFC : Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
- RCE : Réception communautaire européenne
- RTI : Réception à titre isolé
- SAE : Society for Automobile Engineers
- SDIS : Service départemental d'incendie et de secours
- TCO : Total Cost of Ownership (coût total de possession)
- TPRD : Thermally activated Pressure Relief Device (thermofusible)

6.4 - Références bibliographiques et sources

Documentation ministère de l'Écologie, du Développe-ment durable et de l'Énergie :

- « Les obligations réglementaires environnementales des installations du secteur de la distribution. Les stations-service », 08 octobre 2013. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/5-_stations_services.pdf
  Base ARIA http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/ « Accidentologie de l'hydrogène », 2009.

Documentation Afhypac :

- « Proposition d'un plan de déploiement national des véhicules hydrogène du consortium Mobilité Hydrogène France ». http://www.afhypac.org/images/documents/h2_mobilit_france_fr_final.pdf

Transport, stockage et distribution :

- Fiche 4.5.1 « La distribution de l'hydrogène pour les véhicules automobiles (révision octobre 2014) »
- Fiche 4.2 « Stockage de l'hydrogène sous forme de gaz pressurisé »
- « Sécurité, normalisation, réglementation », chapitre 7.3, « La sécurité hydrogène en France, en Europe et dans le monde : normes et règlements »

Documentation ADEME :

- « Guide d'information sur les risques et les mesures de sécurité propres aux installations de production décentralisée d'hydrogène », ADEME, 2015.

Documentation INERIS :

- « Sûreté des dispositifs de stockage de l'hydrogène sous haute pression équipant des véhicules routiers ».
- « Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre », http://www.ineris.fr/centredoc/4.pdf
- « Benchmark stations-service hydrogène », http://www.ineris.fr/centredoc/dra-71-rapport-benchmark-station-service-hydrogene--diffusion-1-1427110132.pdf

Documentation ISO :

- ISO/TS20100 : 2008 gaseous hydrogen fuelling stations

Documentation AFNOR :
- NF M58-003 « Installation des systèmes mettant en œuvre l'hydrogène »
- Portail AFNOR dans le domaine du gaz : http://www.afnor.org/metiers/normalisation/cos/gaz/

Documentation HyApproval.org :
- Handbook for Approval of Hydrogen Refuelling Stations, Version: 2.1, June 4, 2008. http://www.hyapproval.org/
- « L'hydrogène, carburant de l'après-pétrole ? », IFPEN-CEA, mars 2012, Édouard Freund, Paul Lucchese.

Documentation ENSOSP :
- « Développement d'outils pédagogiques nécessaires à l'enseignement du risque hydrogène : Démonstrateurs, simulations réalité virtuelle à l'usage des primo-intervenants, exploitants, autorités administratives et décideurs », février 2014. http://crd.ensosp.fr/doc_num.php ?explnum_id=8105

Documentation SDIS 86 :
- Guide opérationnel départemental de référence : « Interventions d'urgence sur les véhicules »

CETU (Centre d'étude sur les tunnels) :
- Note d'information n°17 sur le transport des marchandises dangereuses : http://www.cetu.developpement-durable.gouv.fr/note-d-information-no-17-a591.html
- H_2 Mobility Germany : http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review14/h2in_butsch_2014_o.pdf
- H_2 Mobility UK : http://www.ukh2mobility.co.uk
- « Étude sur le potentiel de stockage de l'énergie », Ademe, ATEE, DGCIS.
- Note d'information opérationnelle « Risque hydrogène », 18 juin 2013 : http://www.interieur.gouv.fr/Le-ministere/Securite-civile/Documentation-technique/Doctrines-et-techniques-professionnelles/Notes-operationnelles

6.5 - Sites web

- Afhypac : http://www.afhypac.org
- TÜV SÜD : http://www.h2stations.org/
- Hysafe, WP5 base HIAD (Hydrogen Incident and Accident Database) : http://www.hysafe.net/index.php ?ID=25
- Hydrogen Lessons Learned : http://h2tools.org/lessons/
- Bashyc : http://www.alphea.com/rubrique.php ?id_rubrique=2361

HyFacts, http://hyfacts.eu/
- http://hyfacts.eu/2014/education-and-research/
- http://hyfacts.eu/2014/training-material/

Projet HyResponse :
- www.hyresponse.eu

Alphéa « Réseau européen et pôle de compétences sur l'hydrogène et ses applications » :
- http://www.alphea.com

Notes

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, et du ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

www.ademe.fr

“ Ce guide d'information porte sur les technologies de l'hydrogène appliquées à la mobilité, plus particulièrement sur les stations-service distribuant de l'hydrogène et les véhicules légers utilisant ce nouveau vecteur énergétique. Il aborde le sujet sous l'angle des risques et de la sécurité et s'appuie sur les premières réalisations, les savoir-faire industriels, des connaissances d'experts, de spécialistes des problématiques sécuritaires, etc. Il présente à la fois un état des lieux vulgarisé et des recommandations pratiques en vue d'accompagner le déploiement de ce nouveau type de mobilité.

Ce guide s'adresse à un public large, intéressé par les nouvelles technologies utilisant l'hydrogène dans le domaine de la mobilité et potentiellement impliqué dans le cadre d'un projet de déploiement d'une station-service ou de véhicules à hydrogène. ”

8506 | 500 ex. | ISBN : 979-10-297-0134-4 | Juin 2015 | Imprimé sur papier Écolabel avec des encres végétales | O'Communication





MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE, DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE



ADEME
Siège social : 20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01
www.ademe.fr

www.ademe.fr